E. Aisberg

il transistore?

è una cosa semplicissima!

EDITRICE IL ROSTRO MILANO

IL TRANSISTORE?

è una cosa semplicissima!

E. AISBERG

IL TRANSISTORE?

è una cosa semplicissima!

Principi fisici di base - Caratteristiche fondamentali
Applicazioni nei diversi montaggi radio - elettrici

Rivisto ed aggiornato sulla
III edizione originale

Disegni marginali di
POL FERJAC

EDITRICE MILANO

PRESENTAZIONE

Il sorprendente e tumultuoso sviluppo della tecnica elettronica verificatosi in quest'ultimo decennio ha fatto sorgere l'imperioso bisogno in una grande massa di pubblico, di estendere le proprie conoscenze in campo tecnico, senza peraltro approfondirle al livello di vera e propria specializzazione professionale.

Sotto questo profilo di volgarizzazione facile e piacevole, è nato il presente libro sui transistori, queste nuove « bestie a 3 zampe » che stanno progressivamente sostituendo le valvole elettroniche.

Preceduto da due altre opere di uguale intendimento, dello stesso Autore (« La Radio è una cosa semplicissima » e « La Televisione è una cosa semplicissima »), questo libro offre, sotto la forma di un arguto dialogo fra i due amici Curioso e Ignoto, la possibilità di rendersi conto in modo facile e divertente, di cos'è un transistore, su quali basi fisiche è fondato, come viene prodotto ed a quali applicazioni elettroniche si presta.

La notorietà ed il prestigio dell'Autore, Direttore delle note Riviste tecniche francesi « Toute la Radio » e « Television », unite alla competenza specifica nel campo dei transistori del traduttore ing. Vittorio Banfi della R.A.I., sono una garanzia del successo che arriderà indubbiamente a questa traduzione italiana dalla 3ª edizione originale in francese, facente parte di una felice ed indovinata serie di divulgazioni di tecnica elettronica, utilissima sia ai più che ai meno iniziati, desiderosi di estendere la propria cultura tecnica.

EDITRICE IL ROSTRO

INTRODUZIONE

Ciò che occorre sapere prima di iniziare lo studio di questo libro

Simboli delle unità — Sistema decimale

M = mega (1.000.000)	m = metro	W = watt
k = kilo (1.000)	g = grammo	F = farad
m = milli (0.001)	s = secondo	H = henry
μ = micro (0,000.001)	V = volt	Hz = hertz
n = nano (0,000.000.001)	A = ampère	(periodi al
p = pico (0,000.000.000.001)	Ω = ohm	secondo)

Ponendo il simbolo del prefisso decimale davanti a quello dell'unità, si ottengono i diversi multipli e sottomultipli, fra i quali citiamo, a titolo d'esempio:

mm = millimetro	mV = millivolt	pF = picofarad
μS = microsecondo	μV = microvolt	kHz = chilohertz
mA = milliampère	MΩ = megohm	MHz = Megahertz
μA = microampère	μF = microfarad	mW = milliwatt

SENSO DELLA CORRENTE

La corrente elettrica è generata dallo spostamento degli elettroni. Questi nel circuito esterno vanno dal *negativo* al *positivo*. Tale è il senso della corrente adottato nel testo delle pagine che seguono. (Ciò è l'opposto del senso convenzionale secondo il quale la corrente va dal positivo al negativo).

Quando la corrente attraversa una resistenza, vi determina una caduta di tensione. L'estremità della resistenza costituente *l'entrata* della corrente diviene *negativa* nei rispetti dell'uscita.

NOTAZIONI ADOTTATE

Di mano in mano che faremo conoscenza di diverse caratteristiche del transistore, useremo le notazioni seguenti:

I_e = corrente dell'emettitore
I_b = corrente di base
I_c = corrente di collettore
E_b = tensione di base
E_c = tensione di collettore

r_e = resistenza d'entrata
r_u = resistenza d'uscita
α = amplif. di corrente in B.C.
β = amplif. di corrente in E.C.
γ = amplif. di corrente in C.C.

μ = tasso di controreazione interna

Le tensioni delle sorgenti saranno indicate da *U*. Λ indicherà sempre una piccolissima variazione della grandezza preceduta da questa lettera greca (delta).

Ma, rassicuratevi, non vi è affatto bisogno di imparare queste notazioni in anticipo.

Ed ora ascoltiamo ciò che dicono *Curioso* e *Ignoto*:

I PROTAGONISTI

Curioso, giovane professore di elettronica, che ha appreso a suo tempo le basi della radioelettricità da suo zio Radiol; è sempre disposto a soddisfare l'insaziabile curiosità del suo amico...

... *Ignoto*, che fu il suo primo allievo. Le loro conversazioni sono riportate nei due libri « La Radio... è una cosa semplicissima » e « La televisione... è una cosa semplicissima », ove si constata che, se il personaggio mancava talvolta di certe nozioni elementari, era in compenso, dotato d'una facoltà d'assimilazione poco comune.

Attualmente *Ignoto* è impiegato come tecnico in una fabbrica di radioricevitori.

PRIMA CONVERSAZIONE

Non è possibile comprendere facilmente il funzionamento dei transistori senza avere approfondito certe nozioni di fisica e di chimica riguardanti la composizione e l'associazione degli atomi. E' su quest'argomento che i nostri due amici intratterranno la conversazione che leggeremo qui sotto.

SOMMARIO: Semiconduttori — Funzioni e vantaggi del transistore — Influenza del calore sui transistori — Limiti di frequenza e di potenza — Molecole — Atomi — Protoni, neutroni e elettroni — Ripartizione di elettroni su strati — Ionizzazione — Numero di valenza — Reti cristalline.

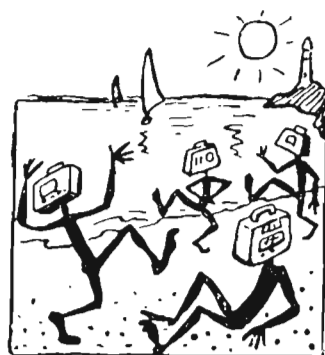
LA VITA DEGLI ATOMI

IGNOTO VITTIMA DEI TRANSISTORI

Curioso. - Felice di rivedervi, caro amico. Avete passato delle buone vacanze?

Ignoto. - Purtroppo, no.

Cur. - E' stato il tempo inclemente, il cielo coperto, ed il mare agitato?

Ign. - Al contrario, avemmo un tempo ideale. Ma non era possibile riposarsi sulla spiaggia, a causa delle innumerevoli radioline a transistori, urlanti. Sotto i fuochi incrociati delle cantanti i miei nervi erano sottoposti ad una rude prova. E di più, desideroso di comprendere come questi transistori riuscivano a fare tanto chiasso, ho

tentato di leggere dei libri che dovevano rivelarmi la teoria e le applicazioni... Non ho capito nulla!

Cur. - Comprendo l'amarezza che vi ha provocato questo insuccesso. Ma il vostro amor proprio non deve essere umiliato: i transistori, credetemi, non è una cosa così semplice!

Aprendo il Congresso Internazionale dei Transistori, tenutosi nel maggio del 1956 a Londra, Lord Hailsham ha detto: « Ritengo che, anche nei paesi più industrializzati, una persona su diecimila sia capace di spiegare ciò che è un transistore e cosa sono i semiconduttori ».

Ign. - Ciò mi consola, tanto più che credo di poter dire cos'è un semiconduttore.

Cur. - Bravo Ignoto! Fate dunque sfoggio delle vostre conoscenze.

LE BESTIE A TRE ZAMPE

Ign. - Ebbene, un semiconduttore deve avere una resistività infinitamente superiore a quella dei conduttori, ma parimenti molto inferiore a quella degli isolanti.

Cur. - Esatto; per quanto passabilmente vago. Diciamo, per precisare che un semiconduttore, quale il germanio (che è principalmente impiegato per la fabbricazione dei transistori), ha una resistività 300 milioni di volte superiore a quella del rame. Ma essa è un milione di milioni di volte inferiore a quella del vetro.

Ign. - Tutto sommato, esso è nella scala delle resistività, più prossimo ai conduttori che agli isolanti.

Cur. - Sì. Ed è a causa del suo particolare modo di condurre le correnti, che il germanio permette di fabbricare le « bestie a tre zampe ».

Ign. - Che cosa chiamate con questo nome?

Cur. - E' il nome che si può dare ai transistori (o « triodi a cristallo »), dato che sono provvisti di tre fili di connessione.

Ign. - Insomma, il transistore, se ho ben capito, sostituisce il tubo elettronico. Ma può assumerne tutte le funzioni? E quali sono i vantaggi?

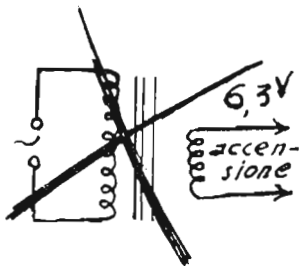
Cur. - Eccomi sepolto sotto una valanga di domande!...

Sì, mio caro Ignoto, esattamente come un tubo elettronico, il transistore può amplificare, o rivelare dei segnali; è capace di generare oscillazioni elettriche; gli si può affidare il cambiamento di frequenze come pure tutte le altre funzioni dei tubi a vuoto.

Quanto ai vantaggi, esso ne possiede numerosi. Anzitutto l'assenza di *riscaldamento catodico*.

Ign. - Magnifico! Non si ha dunque più bisogno di una sorgente di corrente particolare per l'« accensione », come accade per le valvole?

Cur. - No. E per questo fatto, i transistori si mettono a funzionare istantaneamente, appena vengono messi sotto tensione, mentre le valvole esigono una attesa di parecchie decine di secondi prima che il loro catodo raggiunga la temperatura necessaria all'emissione normale degli elettroni.

Ign. - Penso anche che l'assenza di riscaldamento debba determinare un miglior *rendimento energetico*. Poichè nei tubi a vuoto, una certa parte dell'energia procurata dalle sorgenti di alimentazione è persa sotto forma di calore.

Cur. - Esatto. I transistori non conoscono questo deplorevole scempio di « watt » che se ne vanno in inutili calorie, e che caratterizza tutte le « valvole » della radio. Dove un tubo elettronico consuma facilmente 2 o 3 W, un transistore si accontenta di una trentina di milliwatt, quindi di una *potenza cento volte inferiore*.

Ed al posto di qualche 200 V che richiedono i tubi riceventi, il transistore è perfettamente soddisfatto di una tensione di meno di 10 V.

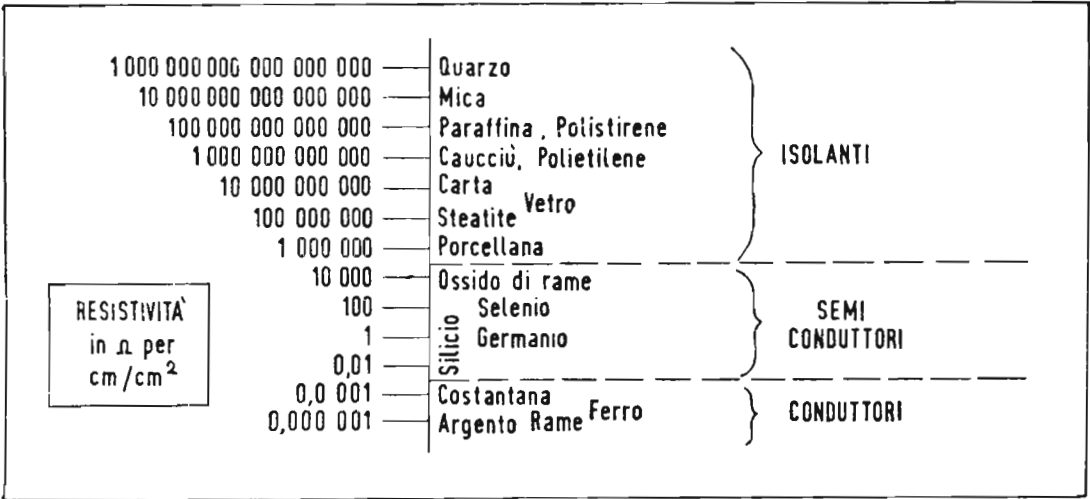



Fig. 1 - Ripartizione dei principali conduttori, semiconduttori e isolanti, in funzione della loro resistività. Si noterà che la resistenza dei semiconduttori varia entro grandi proporzioni, di modo che sulla nostra scala essi occupano delle zone più o meno larghe.

Ign. - Insomma, una o due pile classiche per lampade tascabili dovrebbero essere sufficienti per soddisfare il modico appetito di un ricevitore a transistori?

Cur. - Sì, ed è proprio così che sono alimentati i piccoli ricevitori portatili che vi hanno reso l'esistenza impossibile sulla spiaggia.

Ign. - Possiamo anche pensare che i transistori sono più robusti ed hanno una vita più lunga dei tubi elettronici, poichè non hanno dei fragili filamenti né dei catodi la cui emissione elettronica è soggetta ad esaurirsi?

Cur. - Esatto. Il transistore si distingue sia per la sua robustezza (poichè si tratta di un pezzetto di cristallo di germanio o di silicio, provvisto di tre connessioni e rinchiuso in una custodia ermetica), sia per le sue dimensioni e peso piccolissimi.

Ign. - Magnifico. Null'altro che vantaggi e niente difetti.

IL ROVESCIO DELLA MEDAGLIA

Cur. - Ecco il pericolo dei giudizi azzardati! Purtroppo il transistore ha anch'esso certi difetti. Il più grave è che sopporta molto male il calore. Oltre i 55° C, il suo rendimento cala rapidamente; e portato a più di 85° C, esso non ritroverà più le sue proprietà iniziali, una volta raffreddato (1).

(1) Certi transistori di potenza sopportano delle temperature che possono raggiungere i 100° C.

Si raggiunge questo risultato incorporando delle dosi relativamente elevate di impurità.

E' questo il caso dei transistori al germanio. Quelli al silicio sopportano allegramente delle temperature ben più elevate: 150° C non fanno loro paura. Perchè nel silicio, gli elettroni dello strato esterno sono legati più solidamente al nucleo, come si vedrà più innanzi.

Ign. - Vi prometto quindi di non avvicinare mai il mio ferro da saldare ad un transistore.

Cur. - E farete bene. D'altronde per effettuare delle saldature sulle connessioni dei transistori, si deve intercettare il calore emesso dal saldatore, nell'intento di non riscaldare il corpo del transistore.

Ign. - E come si fa?

Cur. - Molto semplicemente, serrando fortemente una porzione del filo di connessione fra il transistore ed il punto di saldatura, fra le mascelle di una pinza piatta... D'altronde i fabbricanti di transistori fanno le connessioni in filo di materiale cattivo conduttore di calore (ma fortunatamente buon conduttore della corrente).

Ign. - Vi sono appunti che voi possiate formulare contro i transistori?

Cur. - Sfortunatamente sì. Si tratta delle limitazioni di frequenza ed in potenza. Esso può funzionare difficilmente oltre i mille megahertz...

Ign. - Non è poi tanto male, se si pensa che il megahertz è un milione di periodi al secondo.

Cur. - E non può funzionare a potenze elevate, poichè il calore dissipato nel corpo del transistore ne compromette il rendimento.

Ign. - Voi ritenete che questi siano dei difetti proibitivi?

Cur. - Sicuramente no. Da quando è stato inventato, nel 1948, da tre fisici americani, Bardeen, Brattain e Shockley (ai quali è stato conferito il premio Nobel), il transistore è stato incessantemente migliorato. E già sin d'ora esso sostituisce vantaggiosamente il tubo a vuoto in gran parte delle sue applicazioni. Ma non penso però che un giorno si giunga a rinunciare completamente all'impiego dei tubi a vuoto.

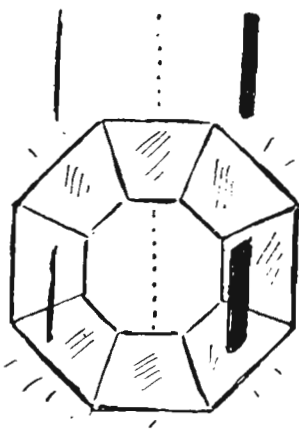
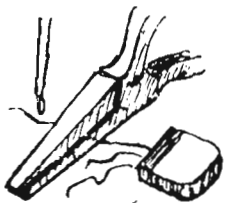
RITORNO ALLE SORGENTI

Ign. - Ora che non sono più assalito dai discordanti accenti dei piccoli ricevitori della spiaggia, ho più che mai desiderio di comprendere come funzionano i transistori ed in qual modo si possono utilizzare.

Cur. - Cosa curiosa: quanto più i circuiti associati ai transistori nei montaggi usuali, sono semplici, tanto più i fenomeni che si manifestano in questi minuscoli triodi a cristallo sono passabilmente complessi.

Ign. - Poichè voi accennate ad un triodo, suppongo che vi sia nel transistore, un catodo, una griglia ed un anodo.

Cur. - Vi si trovano effettivamente delle regioni che, in una certa misura, giuocano un ruolo analogo a quello degli elettrodi di un triodo: emissione di un flusso di elettroni, regolazione della sua intensità e sua captazione. E se voi intendete di andare veramente presto, posso esporvi brevemente l'impiego dei transistori, senza analizzarne il principio di funzionamento. Volete?

Ign. - No. Preferisco comprendere ciò che accade realmente. Voi mi avete abituato a ragionare e ad analizzare il meccanismo dei fenomeni studiati. Continuiamo quindi così.

MOLECOLE ED ATOMI

Cur. - Avete ragione. Ma in questo caso occorre che noi cominciamo dagli inizi remoti, cioè dalla costituzione della materia.

Ign. - Mi sembra che ciò sia una materia che conosciamo già bene. La più piccola particella d'una sostanza, che ne conservi tutte le proprietà chimiche, si chiama *molecola,* dice il mio testo di fisica.

Cur. - Esso però dimentica di aggiungere che noi conosciamo attualmente circa mezzo milione di molecole diverse, risultanti dalle varie combinazioni di qualche 100 elementi semplici.

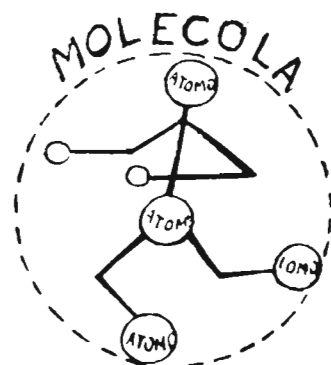
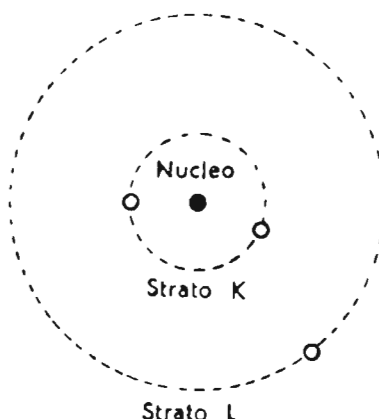



Fig. 2 - L'atomo di litio comprende due elettroni gravitanti attorno al nucleo, sullo strato *K* ed un elettrone sullo strato *L.*

Ign. - Per contro esso dice che le molecole si trovano ad una certa distanza le une dalle altre (ciò che spiega la compressibilità di tutti i corpi), che esse sono attirate le una della altre (fortunatamente, poichè tutto cadrebbe in polvere), e che esse sono animate da un movimento disordinato la cui velocità aumenta con la temperatura.

Cur. - Bravo Ignoto. Voi meritate sempre meno il vostro nome... Spezziamo ora le molecole che si decompongono in *atomi,* cioè in particelle elementari dei corpi semplici (o elementi). Ciascun atomo, voi lo sapete...

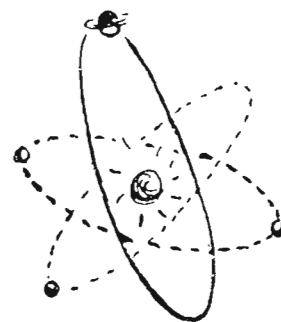
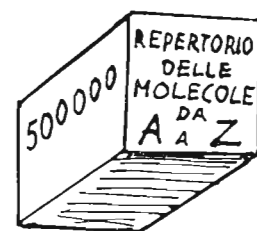
Ign. - ... è un sistema solare in miniatura, col suo sole centrale, che è il nucleo, composto di *protoni* (cariche positive elementari) e di *neutroni;* ed i suoi pianeti sono gli *elettroni* o cariche di elettricità negativa che gravita attorno.

Cur. - Voi parlate come un libro. Ma occorre diffidare dalle analogie. Mentre tutti i pianeti del sistema solare evoluiscono sullo stesso piano, gli elettroni hanno le loro orbite in piani differenti.

E queste orbite non sono affatto disposte a caso: esse non possono occupare che delle posizioni determinate che si indicano sotto il nome di « strati » *K, L, M, N, O, P* e *Q.* Questi sette strati che si possono rappresentare come delle superfici sferiche concentriche aventi il nucleo per centro, hanno dei raggi proporzionali al quadrato del loro rango.

Ign. - Un momento, Curioso. Questo è un po' complicato per me.

Cur. - Nulla di più semplice. Lo strato *K* è lo strato numero 1. Pertanto lo strato *L,* che porta il numero 2, avrà un raggio $2^2 = 4$ volte più grande. Lo strato *M* avrà un raggio $3^2 = 9$ volte più grande, ecc.

Ign. - In modo che il raggio del settimo strato, quello che avete chiamato *Q,* sarà $7^2 = 49$ volte più grande di quello dello strato K?

Cur. - Beninteso. E d'altronde, l'energia della quale ciascun elettrone è animato, è proporzionale al numero (si dice al « numero quantico ») dello strato sul quale si trova.

Ign. - E queste distanze sempre più grandi degli strati in rapporto al nucleo, quale ne è la dimensione reale?

Cur. - Lo strato più prossimo al nucleo, ne è distante 5 miliardesimi di centimetro. Ma temo molto che ciò non vi dica nulla. Immaginate allora che una fata con un colpo di bacchetta magica, possa far crescere le cose dieci volte. Se la nostra fata dà allora 14 colpi di bacchetta magica su un atomo di carbone (il cui nucleo contiene 6 protoni e 6 neutroni e che comprende 6 elettroni dei quali 2 sullo strato *K* e 4 sullo strato *L*)...

Ign. - Il nostro atomo sarà ingrandito di 10^{14} volte e diverrà probabilmente grande quanto il globo terrestre, di guisa che non si saprà più dove collocarlo. La nostra fata sarà bene imbarazzata allora!

Cur. - Niente affatto. Poichè i protoni avranno le dimensioni di semplici mele, mentre gli elettroni (sebbene la loro massa sia 1837 volte inferiore a quella dei protoni) saranno grossi come dei palloni da foot-ball.

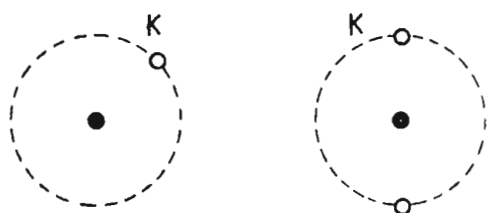



Fig. 3 - Ecco i due atomi più semplici: idrogeno (a sinistra) e elio (a destra).

E se il nucleo è collocato sulla piazza S. Pietro a Roma, i due elettroni dello strato K effettueranno la loro rivoluzione 5 chilometri più in là, cioè alla periferia dell'Urbe.

Circa i quattro elettroni dello strato esterno, li si potrà trovare a 20 chilometri dal nucleo, ad Ostia.

IGNOTO HA LE VERTIGINI

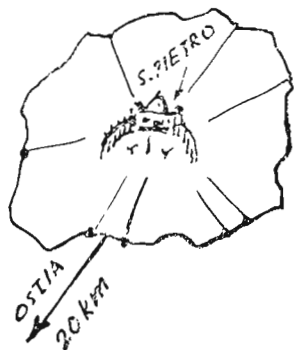
Ign. - Ma allora che cosa si trova fra le nostre mele ed i nostri palloni da foot-ball.

Cur. - Nulla. Il vuoto. E beninteso delle forze d'attrazione, elettriche, magnetiche e gravitazionali che mantengono tutto il sistema in equilibrio. Le cariche di segno contrario essendo mutualmente attratte, fanno sì che gli elettroni non abbandonino i loro nuclei in contrasto con le forze centrifughe che tendono a strapparveli.

Ign. - Mi fate paura. Cosicchè l'edificio dell'atomo comprende così tanto vuoto e così poco materia!

Cur. - Ma certamente, amico mio. E se si potessero comprimere tutti i nuclei e tutti gli elettroni che compongono il vostro corpo, in modo da non lasciare più del vuoto tra loro, si otterrebbe un grano pesante sempre i vostri 70 chilogrammi, ma appena visibile al microscopio.

Ign. - Voi mi fate accapponare la pelle tutte le volte che mi ricordate che anch'io sono composto di atomi. Ed ora che mi avete rivelato quel vuoto che regna entro di me, sono assalito da un'atroce vertigine.

Cur. - Sarà allora più saggio che ci rivolgiamo ad altri atomi che non quelli del vostro corpo. E per rappresentarli più facilmente,

noi stabiliremo di disegnare ogni strato sotto la forma di un cerchio. Vedrete così che l'atomo più semplice è quello dell'idrogeno, che si compone di un solo protone e d'un solo elettrone posto sullo strato *K*. Nell'elio, 2 elettroni posti su questo stesso strato, gravitano attorno a 2 protoni del nucleo.

Ign. - E quale sarà l'elemento con 3 elettroni sullo strato *K*?

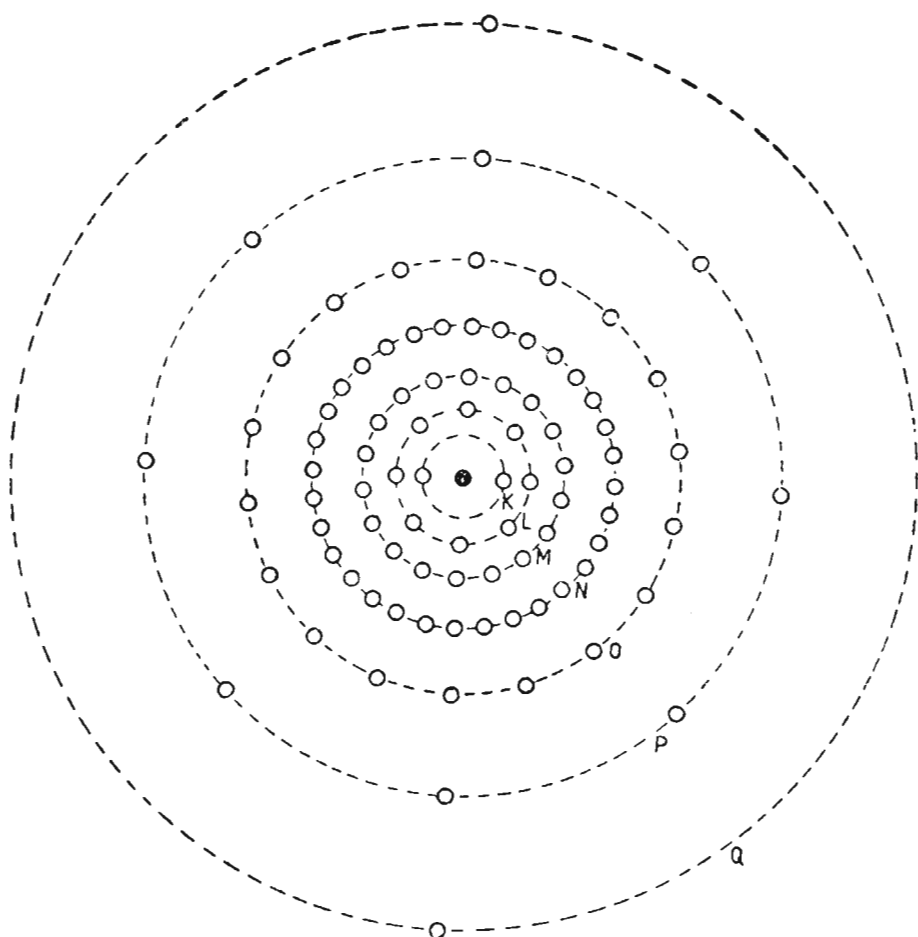



Fig. 4 - Rappresentazione arbitraria dell'atomo di radium, raffigurante la ripartizione degli elettroni su diversi strati. In realtà le orbite sono situate in piani diversi.

NUMERO DI POSTI LIMITATO

Cur. - Nessuno. Poichè questo strato non saprebbe contenere più di due elettroni. Parimenti lo strato *L* non ne potrebbe avere più di 8, lo strato *M* più di 18, lo strato *N* più di 32, lo strato *O* più di 50, lo strato *P* più di 72 e lo strato *Q* più di 98.

Ign. - Impressionante questa sfilata di numeri che recitate così agevolmente.

Cur. - Non ne ho alcun merito poichè essi segnono una legge molto semplice:

Strato $K = 1^2 \times 2 = 2$
Strato $L = 2^2 \times 2 = 8$
Strato $M = 3^2 \times 2 = 18$
Strato $N = 4^2 \times 2 = 32$
Strato $O = 5^2 \times 2 = 50$
Strato $P = 6^2 \times 2 = 72$
Strato $Q = 7^2 \times 2 = 98$

Ign. - Con un totale quindi di 280! Vi sono dunque atomi composti di tanti elettroni?

Cur. - No, perchè se gli strati *K*, *L*, *M*, e N possono effettivamente contenere il numero di elettroni che ho indicato, non se ne trovano mai più di 18 su *O*, più di 32 su *P* e più di 10 su *Q*.

Ign. - Ciò è molto carino, ma ho l'impressione che noi stiamo andando a sprofondarci nei meandri della fisica atomica e nucleare.

Cur. - Al contrario, noi prenderemo subito una decisione che ci semplificherà grandemente lo studio di tutti questi problemi. Se siete d'accordo, noi non terremo ormai più conto che degli elettroni dello strato esterno di un atomo.

Ign. - Questa è buona! Mi rivelate dapprima, con un certo sadismo, l'esistenza di questi vari strati che fanno rassomigliare l'atomo ad una specie di cipolla. Ed ora mi proibite di sfogliarla! E' per risparmiarmi delle lacrime?

NEUTRALITA' E IONIZZAZIONE

Cur. - La decisione che noi dobbiamo prendere è perfettamente legittima. Cos'è che c'interessa, in fine dei conti? E' lo strato elettrico degli atomi. Ora, normalmente, un atomo comporta tanti elettroni quanti protoni, di guisa che le cariche negative di quelli, equilibrano le cariche positive di questi. Un atomo di questo genere è neutro. Ma può accadere che delle forze esterne gli strappino uno o più elettroni. In tal caso l'equilibrio è rotto: le cariche negative degli elettroni sono in totale, inferiore alla carica positiva del nucleo. Perciò l'atomo è *positivo*. Viene allora chiamato *ione* positivo.

Ign. - E se, al contrario, l'atomo ricevesse, per una ragione qualsiasi, degli elettroni in eccedenza, esso diverebbe *negativo*. Suppongo allora che lo si potrà chiamare ione negativo.

Cur. - Perfettamente. Ora, queste perdite o questi acquisti di elettroni (fenomeni d'*ionizzazione*) si verificano sopratutto sullo strato esterno, cioè dove l'attrazione del nucleo si esercita con minor forza.

Ign. - Sì, comprendo ora che, in queste condizioni, solo elettroni di questo strato ci potranno interessare.

PROBLEMI MATRIMONIALI

Cur. - Vi è poi ancora un'altra ragione. E' in effetti, questo strato che determina le affinità chimiche degli elementi. Un atomo non è veramente soddisfatto di vivere, se non possiede 8 elettroni sul suo strato esterno. In queste condizioni, esso è perfettamente stabile e non sogna di perdere od acquistare elettroni. Così per esempio, il neon, che possiede 8 elettroni sullo strato esterno *L*, è molto felice e non cerca di entrare in contatto con alcun altro elemento chimico. Ma il fluoro che in questo stesso strato esterno non ha che 7 elettroni, non chiede altro che di entrare in combinazione con un altro elemento capace di cedergli un elettrone per completare il suo strato esterno ad 8.

Ign. - E come si effettuano questi matrimoni?

Cur. - Ebbene, prendete il caso del cloro che, sul suo strato esterno *M* non ha che 7 elettroni, e quello del sodio che ha 2 elettroni sullo strato *K*, 8 su *L* e solamente 1 su *M*. Ecco l'esempio tipico di una coppia ideale! Il sodio combinandosi col cloro, gli cederà il suo unico elettrone dello strato esterno, completando ad 8 quello del clo-

ro. E, di colpo, nell'atomo di sodio, sarà lo strato *L* coi suoi 8 elettroni, a divenire strato esterno, assicurando all'atomo una perfetta stabilità.

Ign. - Ma allora col suo elettrone in eccedenza, il cloro sarà ionizzato negativamente, mentre il sodio che ha perso questo elettrone sarà ionizzato positivamente?

Cur. - Beninteso. E l'attrazione mutua di questi due ioni renderà stabile l'edificio della molecola risultante da questo matrimonio.

Ign. - E quale ne è il nome?

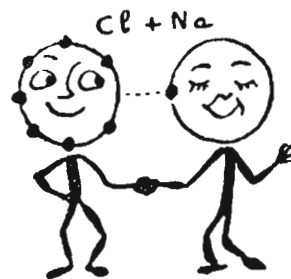
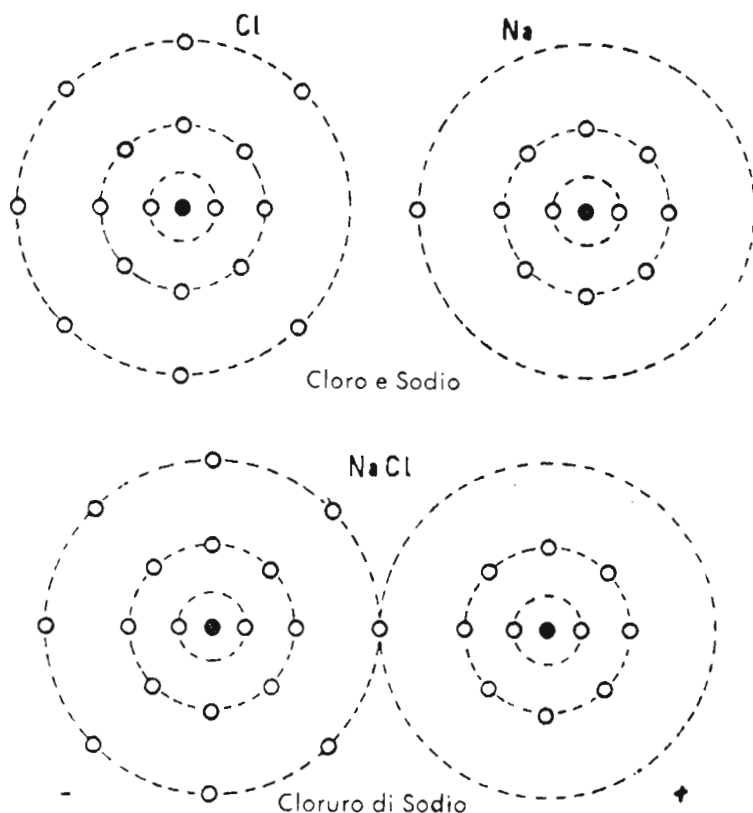



Fig. 5 - Il matrimonio di un atomo di cloro (*Cl*) con un atomo di sodio (*Na*, dal nome latino « natrium ») da luogo ad una molecola di cloruro di sodio.

Cur. - Cloruro di sodio, acquistandolo in farmacia. Ma il vostro tabaccaio vi vende la stessa sostanza sotto il nome di sale da cucina.

Ign. - Ne dubitavo. E suppongo che nello stesso modo si possano spiegare tutte le altre avventure matrimoniali degli atomi. Che cosa accade, per esempio, per l'acqua?

Cur. - Molto semplicemente. L'atomo d'ossigeno comprende 2 elettroni sullo strato *K* e 6 sullo strato L. Vi è dunque posto su questo ultimo, per 2 altri elettroni. E l'ossigeno li impresta a 2 atomi di idrogeno poichè, ve lo ricordo, quest'ultimo non contiene che un elettrone per atomo.

Ign. - Comprendo ora perchè la molecola d'acqua si compone di un atomo d'ossigeno e di due atomi d'idrogeno.

Cur. - Lo strato esterno è sovente chiamato « strato di valenza », poichè il suo numero di elettroni indica quali combinazioni esso è atto ad effettuare. E si indica come « numero di valenza » il numero di elettroni che mancano allo strato per essere stabile ovvero, al contrario, quello che esso può cedere ad un altro atomo per renderlo stabile.

Ign. - Scusatemi, ma ciò non mi sembra chiaro.

Cur. - Se lo strato esterno comporta 6 o 7 elettroni, gliene mancano rispettivamente 2 o 1 per essere completato ad 8. Si dice di tali atomi, ch'essi sono *bivalenti* o *monovalenti*. Ma se lo strato esterno non ha che 1 o 2 o 3 elettroni, l'atomo sarà piuttosto incline a cederli. E noi siamo in presenza di elementi monovalenti, bivalenti o *trivalenti*.

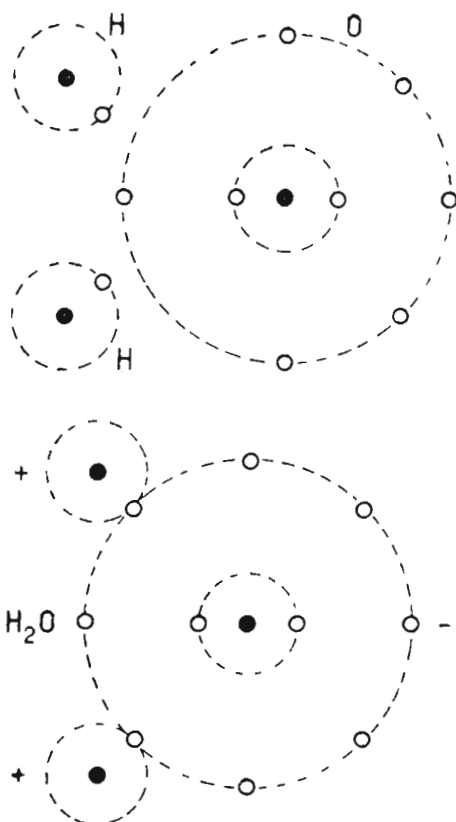
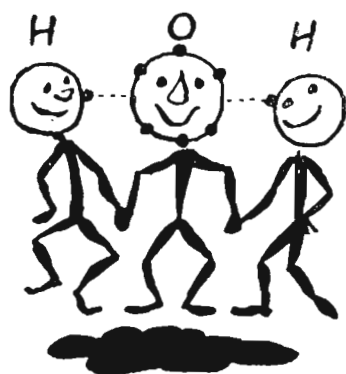



Fig. 6 - Due atomi d'idrogeno (*H*) completano a 8 il numero di elettroni dello strato *L* dell'ossigeno (*O*) formando così una molecola d'ossido d'idrogeno, volgarmente chiamata... acqua.

Ign. - E se lo strato esterno ha 4 elettroni?

Cur. - In tal caso, l'atomo sarà felicissimo di entrare in contatto con un altro, composto ugualmente di 4 elettroni sul suo strato ester-

Num. atomico	Nome dell'elemento	Simbolo	Numero di elettroni su ciascun strato				
			K	L	M	N	O
13	Alluminio	Al	2	8	**3**		
14	Silicio	Si	2	8	**4**		
31	Gallio	Ga	2	8	18	**3**	
32	Germanio	Ge	2	8	18	**4**	
33	Arsenico	As	2	8	18	**5**	
49	Indio	In	2	8	18	18	**3**
51	Antimonio	Sb	2	8	18	18	**5**

Fig. 7 - Ripartizione degli elettroni (il cui numero totale porta il nome di « numero atomico ») sui diversi strati, per i principali elementi che entrano nella composizione dei transistori. In grassetto sono indicati i numeri determinanti la valenza.

no, per stabilire con essi dei legamenti di valenza. Un tale atomo è quindi *tetravalente*. E' questo il caso degli atomi di germanio e di silicio che sono utilizzati nei transistori; ed è anche il caso del carbonio. Infine, se lo strato esterno ha 5 elettroni, l'atomo è *pentavalente*. E poichè noi ritorniamo sulla questione dei transistori, vi voglio presentare qualche altro elemento chimico che entra nella loro costituzione. Da un lato l'alluminio, l'indio, ed il gallio dei quali lo strato esterno non ha che 3 elettroni e che sono trivalenti; d'altro lato lo arsenico e l'antimonio il cui strato esterno ha 5 elettroni e che sono pentavalenti.

LA VITA SOCIALE DEGLI ATOMI

Ign. - Passeremo così in rivista tutti gli elementi chimici?

Cur. - No, rassicuratevi. Ora vi siete familiarizzato con tutto ciò che giuoca un ruolo essenziale nella tecnologia dei transistori.

Ma noi avremmo torto di considerare unicamente la psicologia individuale degli atomi.

Ciò che ci interessa è la loro vita sociale. Ad eccezione di pochi ostinati individualisti, quale il neon che, col suo strato completo di 8 elettroni rifiuta tenacemente ogni combinazione, gli atomi, non dimenticatelo, vivono in società. Ed i loro raggruppamenti sono più o meno bene organizzati. Nei corpi solidi (eccettuati alcuni che, come il vetro si assimilano ai liquidi), gli atomi sono disposti in un ordine ben determinato: essi formano delle *reti cristalline*.

Ign. - In qual modo essi possono associarsi?

Cur. - Ciò dipende dalla natura delle sostanze. In alcune, come il cloruro di sodio, accennato poc'anzi, sono gli elettroni di un atomo a legarsi con ioni positivi di altri atomi. Ma nei corpi che ci interessano, i legamenti sono assicurati da elettroni dello strato esterno (chiamati anche *elettroni periferici* o *elettroni di valenza*).

Prendiamo a mo' d'esempio, il germanio o il silicio. In essi, ogni atomo è legato, per mezzo dei suoi 4 elettroni periferici, a 4 altri atomi pel tramite di uno dei loro atomi periferici. Nella figura 8 appare un solo atomo collegato ai suoi 4 vicini. Ma ciascuno di questi è a sua volta legato a 4 altri atomi, e così di seguito. Ne deriva che ogni atomo sembra essere provvisto di 8 elettroni periferici, ciò che, l'abbiamo già visto, costituisce una condizione di stabilità.

Cercate di immaginare una tale configurazione regolare di atomi nello spazio.

Ign. - Che strana immagine è quella di queste sfere sospese nel vuoto, ciascuna delle quali tende verso i suoi vicini quattro braccia a somiglianza degli Dei indù!... Ma tutti i corpi solidi sono cristallizzati in tal modo?

Cur. - No, caro Ignoto. Comunque molti altri elementi hanno la medesima ripartizione di atomi, particolarmente il carbonio i cui tipici cristalli portano il nome...

Ign. - .... di diamanti. Lo sapevo mio caro. Ed è una fortuna che per la fabbricazione dei transistori si utilizzi il germanio e non il diamante, altrimenti il loro costo sarebbe proibitivo.

Cur. - Ma certamente, ammesso che sia possibile realizzare dei transistori al diamante... Comunque vi sono moltissimi altri modi di cristallizzazione, che a noi ora non interessano. Per contro, ciò che

merita di essere analizzato, è il comportamento degli elettroni dello strato esterno o elettroni periferici.

Ign. - Mi avete detto che si possono staccare più facilmente dall'atomo, essendo meno fortemente attirati dal suo nucleo.

Cur. - Esatto. Ma non lo fanno che quando lo strato esterno ne ospita pochi: 1 o 2 o 3. E' il caso di tutti i metalli. L'oro, l'argento,

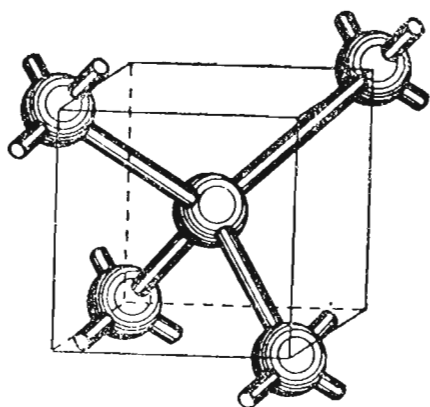
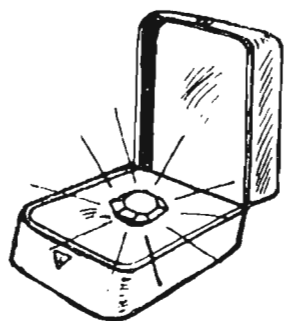



Fig. 8 - L'atomo di germanio, al centro del cubo, è legato per mezzo dei suoi elettroni di valenza, a quattro altri atomi. (Il cubo è stato disegnato unicamente per rendere chiara la disposizione degli atomi nello spazio. I cristalli di silicio e di carbonio (diamante) hanno una struttura identica.

il rame hanno un solo elettrone periferico. Il ferro, lo zinco ed il magnesio ne hanno due, mentre l'alluminio ne possiede tre. Questi elettroni si staccano dall'atomo senza difficoltà e, liberi, fanno parte di quel flusso di elettroni che chiamiamo *corrente elettrica.*

Per contro, i metalloidi hanno molti elettroni sul loro strato esterno, e tali elettroni non hanno, per questo motivo, le tendenze al vagabondaggio dei loro simili costituenti gli atomi dei metalli.

Ecco perchè i metalloidi sono particolarmente degli isolanti.

Ign. - Ma il germanio, coi suoi quattro elettroni periferici, è anche esso un isolante?

Cur. - Sì e no, mio caro. La prossima volta vi spiegherò il senso di questa risposta sibillina.

SECONDA CONVERSAZIONE

Le impurità presenti nei semiconduttori, anche in quantità minime, ne mutano profondamente il comportamento elettrico.
I nostri due amici studieranno qui, ciò che accade quando degli atomi estranei vengono a modificare le strutture cristalline regolari.

SOMMARIO: Conducibilità intrinseca — Cellule fotoresistenti e fotoemissive — Impurità — Donatorì — Buchi o lacune — Accoglitori — Semiconduttori di tipo P *e* N *— Giunzioni — Barriera di potenziale — Tensioni dirette ed inverse — Raddrizzamento da semiconduttori.*

LE GIUNZIONI

LA VITA SERENA DELLE FAMIGLIE

Ignoto. - Ho riflettuto molto sulle vostre reti cristalline, e sono andato al Museo della Tecnica per osservare i modelli che rappresentano la struttura di diversi cristalli. Sono molto carine tutte quelle palline di colori variati raffiguranti gli atomi e collegate fra di loro da asticelle metalliche, che danno l'immagine dei legami di valenza.

Curioso. - Mi felicito molto con voi per questo buon impiego del tempo libero. Ed a che sono pervenute le vostre riflessioni?

Ign. - All'idea che un cristallo di germanio rassomiglia ad un gran numero di famiglie, ciascuna con 4 figlioli, e ciascuno dei figli d'una famiglia è sposato con un figlio di una di 4 altre famiglie. In

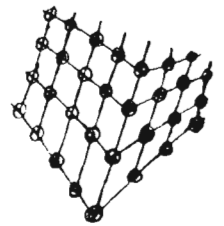
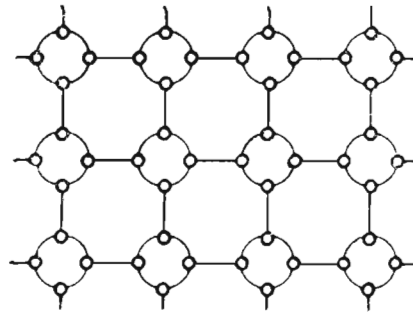
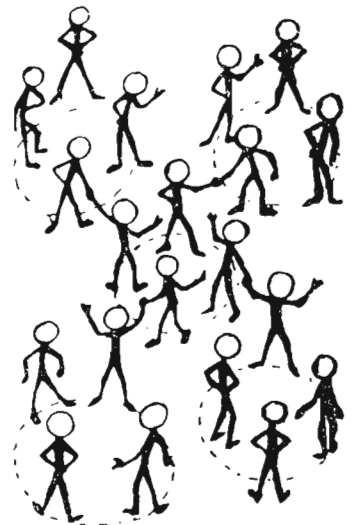



Fig. 9 - La rete cristallina del germanio può essere rappresentata nel modo qui riprodotto. In realtà i legami degli atomi non sono disposti in un piano, ma bensì nello spazio. Comunque la nostra figura offre il vantaggio di essere chiara.

tal modo, ogni famiglia è, tramite i legami matrimoniali, apparentata con 4 altre.

Cur. - Mica male la vostra supposizione. Essa, anzi, mi faciliterà le spiegazioni che volevo darvi. Infatti in questa società perfettamente equilibrata che voi immaginate, non potrebbero verificarsi normalmente dei grandi rivolgimenti. Voglio dire che tutte le coppie devono rimanere fedelmente unite. E, nel nostro cristallo di germanio, tutti gli elettroni devono rimanere agganciati ai loro atomi mediante dei solidi legami di valenza.

Ign. - Però, che cosa ne fate della passioni umane?

QUALCHE DIVORZIO

Cur. - Vedo che avete letto qualche romanzo sentimentale... Ebbene, sì. Analogamente agli esseri umani che sono agitati dalle passioni, gli atomi subiscono l'agitazione termica. Essa perviene, di quando in quando, a rompere i legami che attaccano un elettrone al suo atomo, ed a liberarlo. E voi sapete che quando vi sono degli elettroni liberi...

Ign. - ... il corpo diviene conduttore di corrente. Vi sono molti elettroni liberi nel germanio alla temperatura ordinaria?

Cur. - No, pochissimi. Appena 2 elettroni ogni 10 miliardi (10^{10}) di atomi. All'incirca è come se, per una popolazione doppia di quella della terra, non vi fosse che un solo uomo libero!

Ign. - Che orribile situazione! Ma se è così, il germanio è un cattivissimo conduttore.

Cur. - Infatti. Ed è questa la ragione per la quale si chiama semiconduttore. Tenete comunque presente che un grammo di germanio contiene diecimila miliardi di miliardi (ossia 10^{22}) di atomi, in modo che vi si trovano pur sempre qualche duemila miliardi (ossia 2×10^{12}) di elettroni liberi. Sempre meglio che nulla, quindi... e ciò è sufficiente per permettere il passaggio d'una debole corrente.

Ign. - Mi accennate a miliardi di miliardi di elettroni ed affermate che la corrente è debole!

Cur. - Avete dunque dimenticato, Ignoto, che l'intensità di un Ampere corrisponde al passaggio di sei miliardi di miliardi (6×10^{18}) di elettroni per secondo? Voi vedete quindi che i nostri poveri migliaia di miliardi di elettroni liberi, dispersi nell'immensa rete cristallina del germanio, non possono assicurare che una debole conducibilità. Questa, dovuta all'agitazione termica (ve lo ricordo), porta il nome di *conducibilità intrinseca.*

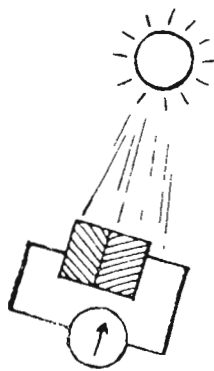
Ign. - E', insomma, come se, nella nostra regolata società, vi fosse qualche raro divorzio e risposamento, che determinassero degli spostamenti da una famiglia all'altra.

Cur. - E' proprio così. E per meglio usare il vostro paragone, diremo che potrebbe sollevarsi il « vento turbinoso delle passioni » (come si legge nei romanzi) che provocherebbe allora dei grandi rivolgimenti.

Ign. - Indovino ciò che volete dire. Se si accresce la temperatura di un cristallo di germanio, l'agitazione termica diviene più violenta e perviene a liberare un numero più grande di elettroni. La conducibilità intrinseca aumenta allora. Contrariamente ai conduttori, la resistenza dei semiconduttori diminuisce quando la temperatura aumenta.

Cur. - Molto bene, Ignoto! Ed è per questo che il germanio funziona male alle temperature elevate. Poichè non è la sua conducibilità intrinseca che a noi interessa e che si utilizza. Il silicio, invece, sopporta meglio il calore, perchè i suoi elettroni di valenza, posti sul terzo strato, sono più solidamente agganciati al nucleo di quelli del germanio, che si trovano sul quarto strato. Aggiungerò che si può anche propocare la liberazione di elettroni apportando agli atomi del semiconduttore non più dell'energia calorifera, ma quella della luce.

Ign. - Volete dire che i « fotoni », questi grani di luce bombardando gli atomi di germanio pervengono a strapparne degli elettroni?

Cur. - Certamente. Ed è ciò che permette di fare delle cellule fotoelettriche, cioè dei dispositivi la cui resistenza varia sotto l'azione

dell'illuminazione. La più antica delle cellule conosciute è quella utilizzante il selenio, che è parimenti un semiconduttore.

Ign. - Io mi servo d'altronde di un fotometro per le mie fotografie, utilizzante una di tali cellule...

Cur. - Questa cellula non è però al selenio, che è una sostanza foto-resistente, ma probabilmente al cadmio o al silicio. Sono delle sostanze foto-emissive, che trasformano cioè l'energia luminosa in corrente elettrica.

Ign. - Non sono queste cellule, che colpite dalla luce del sole, assicurano l'alimentazione in corrente elettrica di certi satelliti artificiali?

LO SCANDALO DELLE FAMIGLIE NUMEROSE

Cur. - Sì, Ignoto, ma ora non provocheremo una perturbazione nella vostra società così ben organizzata, introducendovi una famiglia di cinque figli.

Ign. - Che cosa volete dire con ciò?

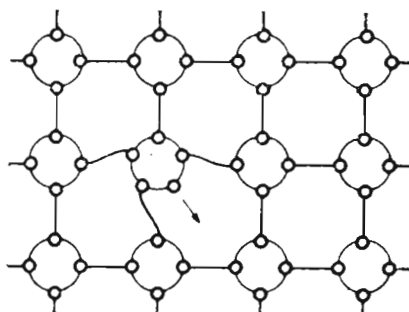



Fig. 10 - Un atomo d'impurità pentavalente è venuto a rompere il bell'ordinamento della rete cristallina. Che cosa avverrà del 5° elettrone di questo atomo?

Cur. - Che tra gli atomi del più puro germanio, si trovano in piccolissima quantità degli atomi di altri elementi costituenti delle « impurità ». Il germanio più puro ne contiene pertanto in proporzione di un miliardo.

Ign. - E' come se non ve ne fosse affatto.

Cur. - Avete torto di trascurare queste impurità, poichè anche in così minime proporzioni, ciò rappresenta cinquantamila miliardi d'atomi estranei in un centimetro cubo di germanio cosiddetto « puro ».

Ign. - Non pensavo proprio che questo centimetro cubo contenesse cinquantamila miliardi d'atomi... Ma come si comporta la famiglia di cinque figli? Volete dire che si tratta di un atomo con cinque elettroni sullo strato esterno?

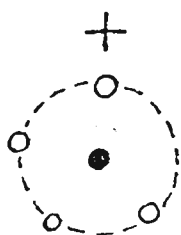
Cur. - Esattamente Un atomo pentavalente, per esempio quello di arsenio o d'antimonio, si è introdotto nella nobile società degli atomi di germanio... e scoppia lo scandalo!

Ign. - Poichè se si riesce a sposare quattro dei figli di questa famiglia originale, coi figli delle famiglie vicine, il quinto rimane disperatamente celibe.

Cur. - Sì, Ignoto, avendo i quattro primi elettroni formato dei legami di valenza con quattro atomi vicini della rete cristallina, il quinto resta libero. E se una voce lo chiama verso una delle estremità del cristallo, esso ne supererà le maglie per raggiungerla.

Ign. - Se capisco bene, applicando una tensione fra due punti di un tale cristallo, si può far passare della corrente, perchè gli elettro-

ni liberi, dovuti agli atomi pentavalenti, saranno attratti dal polo positivo e vi affluiranno, mentre il polo negativo della sorgente lascerà allora entrare nel cristallo lo stesso numero di elettroni.

Cur. - Sì, è proprio questo che si verifica nel semiconduttore contenente delle impurità pentavalenti; cioè con un eccesso di elettroni. Si vuol dire che il semiconduttore è del *tipo N* (negativo). E gli atomi delle impurità sono sovente chiamati *donatori* (poichè essi danno degli elettroni liberi).

Ign. - Qual'è il tasso normale delle impurità?

Cur. - Tutt'al più un atomo per dieci milioni di atomi di germanio, cioè la proporzione di tre persone per tutta la popolazione italiana.

Ign. - Sì, e ciò rappresenta pur sempre cento volte più d'impurità nei rispetti del germanio più puro. Ma cosa diviene poi l'atomo di impurità, supponiamo d'arsenio, il cui elettrone libero si è distaccato? A mio parere esso cessa di essere neutro ed avendo ormai meno elettroni che protoni, deve diventare positivo.

Cur. - Proprio così. Per quanto ciò possa sembrare paradossale, nel germanio di tipo N, gli atomi delle impurità si trovano ionizzate positivamente.

STORIE DI RAPIMENTI DI BAMBINI

Ign. - E che cosa accadrà nella nostra società cristallina se una delle famiglie non avesse che tre figli, cioè se si introducessero nel cristallo di semiconduttore degli atomi aventi solamente tre elettroni nello strato esterno?

Cur. - Lo scandalo scatenato non sarebbe affatto minore che nel caso delle famiglie troppo numerose. Quest'atomo trivalente allaccia

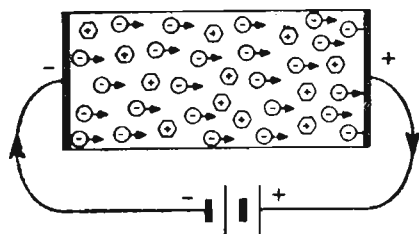



Fig. 11 - Conduzione in un semiconduttore di tipo *N*. Gli elettroni liberi (segnati —) si staccano dagli atomi pentavalenti che per questo fatto, sono ionizzati positivamente (segnati +).

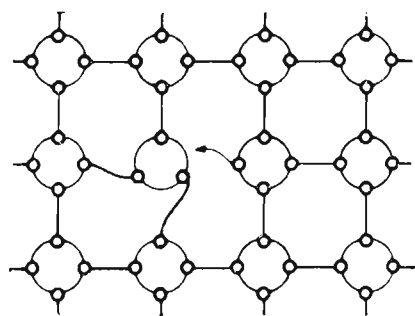
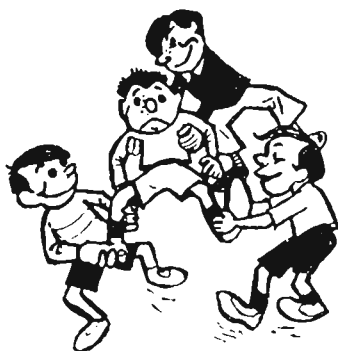



Fig. 12 - Qui, la rete cristallina del semiconduttore contiene un atomo d'impurità trivalente che tenterà di attirare un elettrone d'un atomo vicino.

dei legami di valenza con tre atomi vicini, ma il quarto resta vuoto. Si forma così un « buco » od una « lacuna », che un elettrone di un atomo vicino potrà benissimo eliminare.

Ign. - Insomma, questa famiglia con tre figli non chiede altro che di adottarne un quarto, per seguire la tradizione della tribù, o piuttosto per conformarsi alla sua organizzazione generale. Ma se esso « impresta » questo figliolo ad una famiglia vicina, questa a sua volta presenterà una lacuna.

Cur. - Beninteso. E questo movimento di prestiti o di rapimenti di figlioli può anche propagarsi da un estremo all'altro del cristallo.

Ign. - Applicandovi una tensione, suppongo?

Cur. - Evidentemente. Ma seguite attentamente ciò che accade allora. Un elettrone proveniente dalla direzione verso la quale si trova il polo negativo, va a colmare la « lacuna » dell'atomo trivalente.

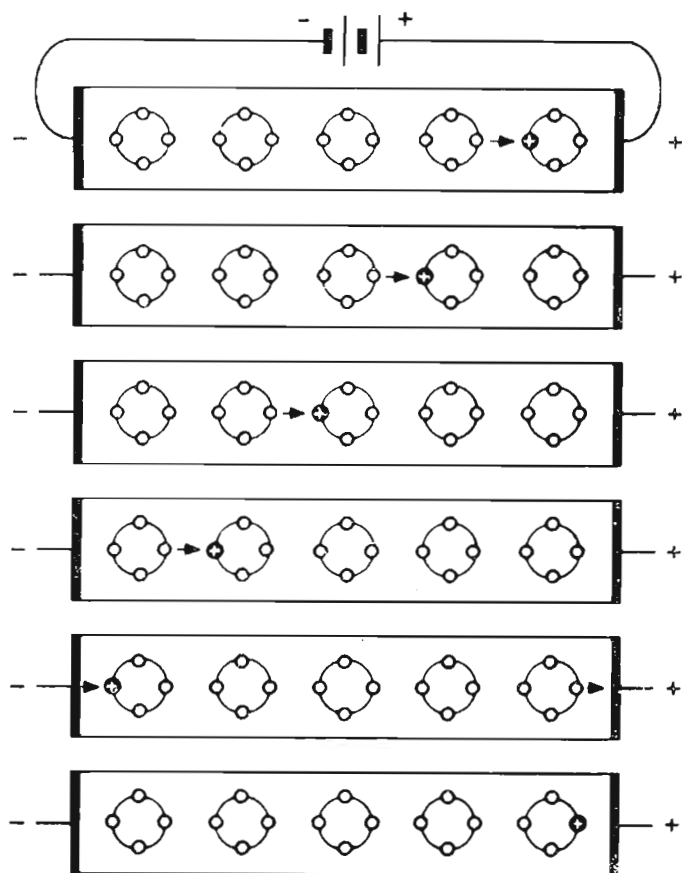
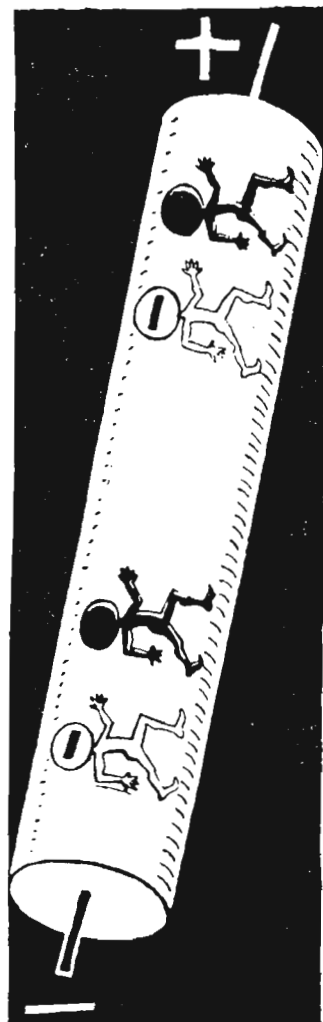



Fig. 13 - In un semiconduttore di tipo P, la « lacuna » d'una impurità trivalente è colmata da un elettrone proveniente dal lato negativo; ciò crea una nuova « lacuna » che, a sua volta, è colmata da un elettrone proveniente da un atomo vicino, e così di seguito.
Lo schizzo mostra le fasi successive di questa conduzione, ove la « lacuna » (che costituisce una carica positiva) si sposta dal polo positivo al polo negativo.
Nell'ultima fase, un elettrone proveniente dalla sorgente di corrente va a colmare la « lacuna » più prossima al polo negativo; nello stesso tempo, un altro elettrone abbandona l'atomo più prossimo al polo positivo, creandovi una nuova « lacuna ». E tutto ricomincia daccapo.

L'elettrone si è quindi avvicinato al polo positivo, mentre una nuova « lacuna » si è formata nell'atomo vicino, più prossimo al polo negativo. Poi, lo stesso fenomeno si ripete. La nuova « lacuna » è a sua volta, colmata da un elettrone che si accosta al polo positivo, mentre una « lacuna » si è venuta così a formare ancora più vicino al polo negativo. E quando in seguito a questi spostamenti, un elettrone raggiunge il polo positivo, dal quale è diretto verso la sorgente di tensione, una « lacuna » raggiunge il polo negativo, ove viene colmato da un elettrone proveniente dalla sorgente.

I DUE « FLUIDI »

Ign. - Insomma, mentre gli elettroni si dirigono, secondo le regole, verso il polo positivo, le « lacune » si spostano verso il polo negativo, come se fossero delle cariche elettriche.

Cur. - Sì, effettivamente, tutto avviene come se, in un semiconduttore con impurità trivalenti, delle cariche positive, — il contrario degli elettroni —, si propagassero dal polo positivo verso il polo negativo.

Ign. - Così le « lacune » seguono la direzione convenzionale della corrente elettrica, dal positivo al negativo, mentre gli elettroni vanno in senso contrario. Ma si può dire che si ha con ciò una corrente formata da cariche positive?

Cur. - Perchè no? Tempo fa, un fisico di nome SYONER ha avanzato l'ipotesi che la corrente fosse formata da due « fluidi » moventisi in senso contrario. Non si deve comunque dimenticare che la « lacuna » non è che un posto vacante offerto ad un elettrone.

Ign. - Suppongo che il semiconduttore avente impurità trivalenti, debba appartenere al tipo P (positivo).

Cur. - E' proprio così che lo si indica. E poichè siete in vena di ragionare correttamente, potete dirmi ciò che divengono gli atomi delle impurità quando gli elettroni provenienti dagli atomi vicini, colmano le loro « lacune »?

Ign. - Essi divengono negativi, ionizzazione dovuta al fatto che il numero dei loro elettroni diviene superiore a quello dei loro protoni... E' comunque curiosissimo, che nel tipo N le impurità divengono ionizzate positivamente e nel tipo *P*, negativamente

Cur. - Aggiungerò che questi atomi d'impurità del tipo *P*, quali quelli dell'alluminio, del gallio, o dell'indio, sono sovente chiamati « accoglitori », sono essi che ricevono degli elettroni, mentre quelli del tipo *N* li donano.

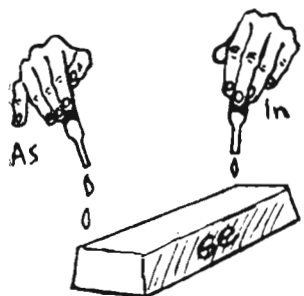
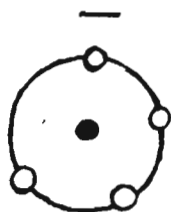
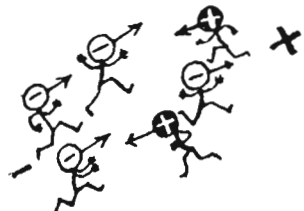
Ign. - Mi sembra che una grande insalata si stia formando nel mio cervello, con tutti questi « donatori » e « accoglitori ».

Cur. - Cercate allora di associare semplicemente la N alla parola « donatore » e la *P* alla parola « accoglitore ».

Ign. - Grazie. Questo è più facile.

UNA GIUNZIONE CHE E' UNA BARRIERA

Cur. - E poichè conoscete ora i costumi di queste società cristalline, la cui tranquillità è perturbata dalle stravaganti famiglie di donatori ed accoglitori, esaminiamo ciò che darebbe l'associazione di un semiconduttore di tipo *N* con un altro di tipo P. Immaginate che io riesca a congiungere un pezzetto di germanio di un tipo con un altro di tipo opposto. O meglio ancora che, prendendo una barretta di germanio puro, ne inquini una metà introducendovi degli atomi donatori (per esempio dell'arsenico), mentre l'altra metà sia infestata da degli atomi accoglitori (quelli dell'indio, se volete). La zona limite fra questi due tipi di semiconduttori porta il nome di *giunzione N-P*. Il suo spessore è dell'ordine di 0,3 millimetri, ma questa sottigliezza non le impedisce di giuocare un ruolo prodigioso.

Ign. - Non vedo cosa vi sia di speciale. In ciascuna metà della

nostra barretta gli elettroni continueranno le loro piccole passeggiate, ignorando ciò che avviene nell'altra metà.

Cur. - Errore! L'agitazione termica normale sarà ora accompagnata da un altro fenomeno. Gli atomi, ionizzati negativamente della regione *P*, respingeranno lontano dalla giunzione gli elettroni liberi della regione *N*.

Ign. - E' vero; non avevo pensato a queste repulsioni di cariche dello stesso nome... Ma in questo caso, gli atomi ionizzati positivamente della regione *N* dovranno a loro volta, respingere lontano dalla giunzione le « lacune » della regione *P*.

Cur. - E' infatti esatto che queste « lacune » (che si possono considerare come cariche positive elementari) sono in tal modo respinte. In realtà gli ioni positivi della regione *N* attirano degli elettroni della regione *P* verso la giunzione, facendo loro colmare le « lacune » che si trovano vicine. E gli elettroni così strappati, lasciano delle lacune negli atomi più lontani della giunzione. Ma tutto si svolge come se le « lacune » avessero migrato verso l'estremità della zona *P*.

Ign. - E nella parte prossima alla giunzione, tutte le impurità della zona *P* saranno quindi colmate, od in altre parole, ionizzate negativamente. Parimenti nella zona *N*, tutti gli atomi pentavalenti, prossimi alla giunzione, avranno perso un elettrone, ciò che li renderà positivi. Tutto ciò è molto curioso: questa giunzione diviene una specie di barriera fra le due zone, delle quali una è ad un potenziale negativo, e l'altra ad un potenziale positivo.

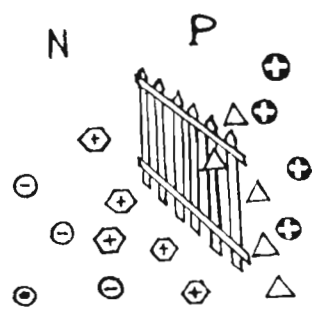
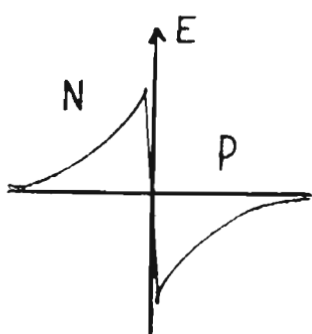



Fig. 14 - Giunzione *N-P*. Le lacune della zona *P* sono colmate vicino alla giunzione, ma non lo sono nelle parti più lontane. Parimenti gli elettroni liberi della zona *N* sono respinti lontano dalla giunzione; essi provengono dagli atomi d'impurità più prossimi.
(Notare i quattro simboli che saranno utilizzati nella figura seguente).

⊖ ELETTRONE
⭘ LACUNA
⊕ DONATORE ionizzato
△ ACCOGLITORE ionizzato

Cur. - Sì, voi avete ragionato molto bene: la giunzione costituisce una vera *barriera di potenziale*. In questa sottile pellicola di semiconduttore, il potenziale degli atomi ionizzati passa bruscamente da un valore positivo (nella zona *N*, non dimenticatelo) ad un valore negativo (nella zona *P*). Ma la carica totale è nulla, perchè in ogni regione le cariche positive e negative si equilibrano e si annullano. Congiungendo il semiconduttore *P* al semiconduttore N, abbiamo semplicemente provocato uno spostamento di queste cariche verso le due estremità di ciascuna regione, mentre dapprima esse erano ripartite press'a poco ugualmente.

Ign. - Tutto ciò mi sembra chiarissimo. Ma qual'è l'utilità della nostra giunzione con la sua barriera di potenziale?

Cur. - Voi la troverete immediatamente se applicherete una tensione alle due estremità della nostra barriera.

ELETTRONI E LACUNE A PASSEGGIO

Ign. - Suppongo che avremo una corrente costituita da una parte dagli elettroni liberi della regione *N* e da un'altra parte dalle lacune della regione *P* gli uni diretti in senso contrario degli altri.

Cur. - Ciò che dite può essere vero, ma voi andate un po' troppo presto su quest'argomento. Conviene, infatti, esaminare ciò che accade secondo la polarità dei potenziali applicati. Ammettiamo dapprima che il polo positivo della sorgente sia collegato alla zona *P* ed il polo negativo alla zona *N*.

Ign. - Benissimo. Nella zona *N*, gli elettroni liberi del semiconduttore saranno respinti verso la giunzione da quelli provenienti dal-

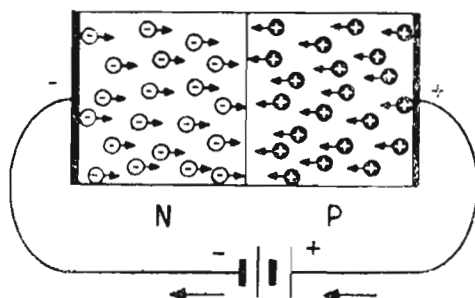
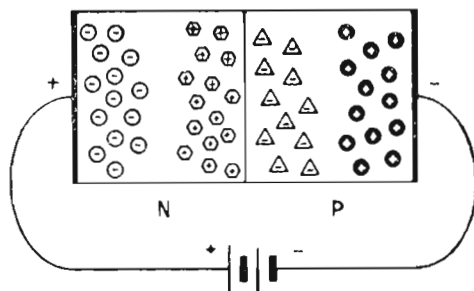



Fig. 15 - Passaggio di corrente in una giunzione *N-P*. Nello schizzo abbiamo rappresentato solo i portatori di cariche: elettroni (indicati con —) e lacune (indicate con +), omettendo per maggior chiarezza, i donatori della zona *N* e gli accoglitori della zona *P*.

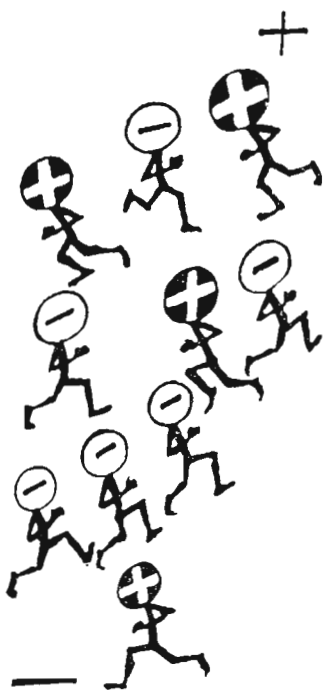
Fig. 16 - Applicando alla giunzione *N-P* una tensione inversa si urta nella « barriera di potenziale » che impedisce il passaggio di corrente. La tensione sulla giunzione, aumenta.

la sorgente. Essi attraverseranno quindi la giunzione e si metteranno a colmare le lacune che il potenziale positivo della sorgente avrà sospinto verso questa giunzione.

Cur. - Diciamo, per maggiore precisione, che il polo positivo della sorgente attirerà un elettrone ogni volta che un altro elettrone avrà attraversato la giunzione, saltando dalla zona *N* verso la zona *P*. E l'elettrone attirato dalla sorgente, creerà una lacuna che, colmata da un elettrone più prossimo della giunzione vi lascerà a sua volta una lacuna. E così di seguito, la lacuna si sposterà verso la giunzione ove un nuovo elettrone emanante dalla zona *N*, la colmerà.

Ign. - Avevo perciò perfettamente ragione dicendo che si era stabilita una corrente formata da elettroni e da lacune, dirette gli uni in senso inverso delle altre.

Cur. - Sì, ciò è esatto quando si applica, come noi abbiamo fatte una tensione alternativa la corrente passerà nell'alternanza diretta, P ed il polo negativo alla zona N. Ma se si applica una *tensione inversa*, le cose non andranno più così bene.

Ign. - Perchè dunque? Gli elettroni del polo negativo della sor-

gente attraggono le lacune della zona *P* più vicino all'estremità della barretta. Ed all'altra estremità, il potenziale positivo della sorgente attira sempre più gli elettroni liberi. Perbacco!... Ciò non farà che rinforzare la barriera di potenziale... e nessuna corrente si potrà stabilire!

Cur. - Voi l'avete detto. Vedete quindi che la corrente non si stabilisce che alla condizione di applicare la tensione diretta, cioè il polo positivo alla zona *P* ed il polo negativo alla zona *N*. Ma se inverti-

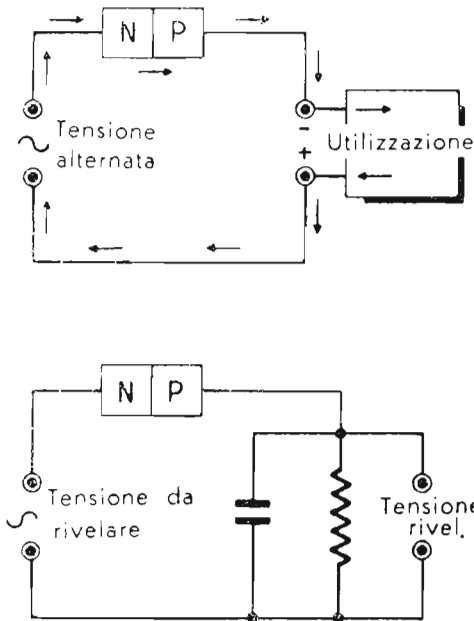
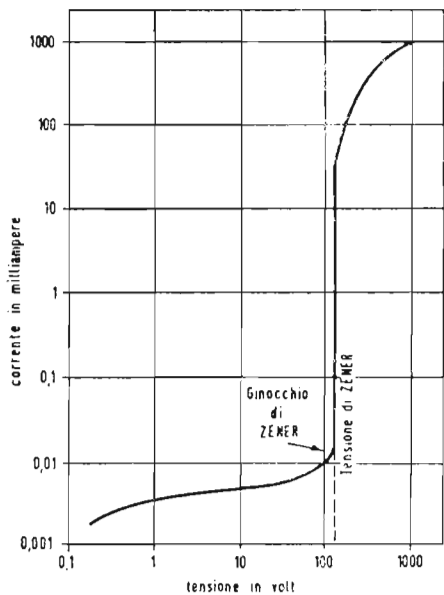
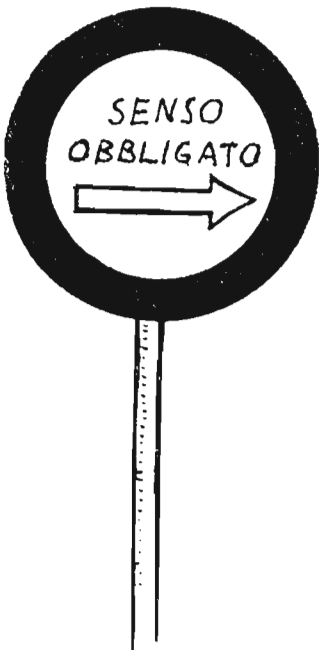



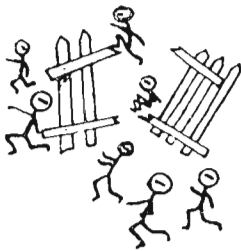
Fig. 17 (a sinistra) - Intensità di corrente inversa di una giunzione, in funzione della tensione applicata.
Attenzione: le scale non sono lineari, ma bensì logaritmiche.

Fig. 18 (in alto a destra) - La giunzione *N-P* può servire da raddrizzatore di corrente, alla stessa stregua delle valvole a vuoto e per di più senza richiedere una tensione di riscaldamento! Il nostro schizzo, mostra lo schema del raddrizzatore ad una semi-onda.

Fig. 19 (in basso a destra) - Il diodo a giunzione *N-P* serve da rivelatore. La tensione rivelata viene raccolta su una resistenza ed integrata con l'ausilio di un condensatore.

te le polarità, non vi sarà corrente, o per lo meno, vi sarà solo una *corrente inversa* estremamente debole.

Ign. - Anche se si applica una tensione elevata?

Cur. - Anche in questo caso, ma solamente sino ad un certo limite. Se lo si supera, la barriera di potenziale si rompe e gli elettroni si precipitano in valanga: d'un solo colpo, la corrente diviene intensa. Questo fenomeno è stato illustrato da Zener e la tensione inversa alla quale si manifesta porta il nome di *tensione di Zener*. Sebbene questo fenomeno venga utilizzato in certe applicazioni elettroniche, per quanto ci riguarda noi non avremo più occasione di richiamarlo. E, per noi la giunzione resterà conduttrice nel senso diretto e praticamente isolante nel senso inverso.

SENSO UNICO OBBLIGATORIO

Ign. - Ma allora, questa giunzione che è conduttrice a senso unico, costituisce un vero e proprio raddrizzatore?

Cur. - Ma sì, mille volte sì, mio caro Ignoto. Perchè se vi applicate una tensione alternativa la corrente passerà nell'alternanza diretta, ma non passerà nell'alternanza inversa.

Ign. - Come in qualsiasi diodo?

Cur. - Perfettamente. Ed è la ragione per la quale la giunzione

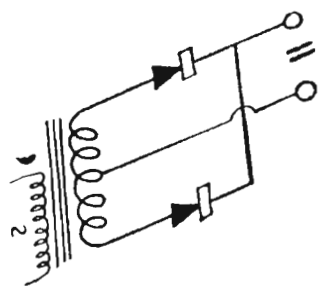



Fig. 20 - Il simbolo del diodo a giunzione adotta purtroppo il senso convenzionale della corrente: la freccia indica infatti un passaggio dal positivo al negativo, ciò che è contrario al reale senso di circolazione degli elettroni...

P-N, viene anche chiamata *diodo* semiconduttore. Come ogni diodo, esso può servire da rivelatore. Ed essa si adatta perfettamente a questa funzione. Anche meglio dei diodi a vuoto, quando si tratta di correnti a frequenze molto elevate.

Ign. - E si può parimenti utilizzare le giunzioni per il raddrizzamento di correnti relativamente intense, per esempio al posto delle valvole per la tensione anodica?

Cur. - Ciò si fa correntemente. Dei raddrizzatori al silicio, all'ossido di rame, o al selenio, sostituiscono vantaggiosamente le valvole a vuoto. Essi sono più robusti ed hanno una vita molto più lunga.

Ign. - Se è così, non esito a gridare: « Viva i semiconduttori! ».

TERZA CONVERSAZIONE

Dopo avere esaminato nell'ultima conversazione, le proprietà delle giunzioni, i nostri due amici abbordano qui lo studio del transistore che, in questa prima presa di contatto, rivela delle profonde similitudini e non meno profonde differenze col tubo a vuoto.
Curioso e Ignoto analizzano il meccanismo dell'amplificazione del transistore e fanno delle interessanti constatazioni in merito alle relative impedenze d'entrata ed uscita.

SOMMARIO: Transistori P-N-P *e* N-P-N — *Corrente di riposo — Corrente di base — Effetto transistore — Amplificazione di corrente — Analogia tubo-transistore — Resistenze d'entrata e d'uscita — Amplificazione di tensione — Alimentazione del transistore.*

BUONGIORNO, TRANSISTORE

UNO STUPIDO SCHERZO

Curioso. - Buongiorno Ignoto. Perchè arrivate in ritardo e per di più con quest'aria furibonda?

Ignoto. - Ce n'è di che... Lo sapete che la nostra strada è diventata inaccessibile alle automobili?

Cur. - E' a senso unico. Ma è sufficiente di accedervi nel senso giusto per...

Ign. - Non vi è più un senso giusto! Degli incoscienti che si credono senza dubbio molto spiritosi, hanno piazzato all'altro estremo un segnale di senso vietato, in modo che, ora, l'entrata alla vostra strada è vietata da entrambe le estremità.

Cur. - Dopo tutto, questo scherzo è stato forse architettato da qualcuno che soffriva il rumore delle automobili... Eccoci quindi tranquilli, ciò che ci permetterà di esaminare finalmente il principio del transistore.

Ign. - Sono ansioso di sapere come è fatta questa « bestia a tre zampe ».

Cur. - Ebbene, non vi è nulla di complicato. Un transistore si compone di due giunzioni messe in opposizione. Si può, per esempio,

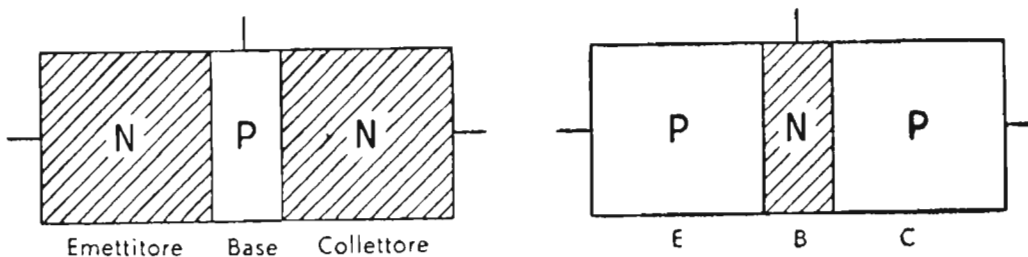



Fig. 21 - Due tipi fondamentali di transistori: *N-P-N* e *P-N-P*.

prendere una giunzione *N-P* ed una *P-N* e, rendendo comune la loro parte *P*, ottenere un transistore del tipo *N-P-N*.

Ign. - Ugualmente penso, una congiunzione delle giunzioni *P-N* e *N-P*, darà luogo ad un transistore *P-N-P*.

Cur. - Evidentemente. Aggiungerò che una delle zone estreme porta il nome di *emettitore* e l'altra quello di *collettore*, mentre la zona mediana (che deve essere sottilissima e su ciò insisto) è chiamata *base*.

Ign. - Insomma, un transistore è una specie di sadwich ove, fra due grossi pezzi di pane, si trova una sottile fetta di prosciutto.

Cur. - Se volete.

Ign. - Ebbene, lasciatemi dire che il nostro sadnwich non è più commestibile di quanto sia accessibile la vostra strada.

UN SANDWICH IMPENETRABILE

Cur. - Cosa volete insinuare, mio caro amico?

Ign. - Semplicemente che due giunzioni messe in opposizione interdicono il passaggio della corrente nei due sensi esattamente come i due segnali di « senso proibito » impediscono l'entrata nella vostra strada, da qualsiasi estremo voi tentiate di accedervi.

Cur. - Mica male, il vostro ragionamento. Voi finirete anzi, per sospettarmi di essere l'autore dello stupido scherzo che avrei commesso al solo scopo di rendervi più facile la comprensione del transistore... Il fatto però è che, se si applica una tensione ad un transistore fra emettitore e collettore, qualunque sia la polarità, vi sarà sempre una delle due giunzioni che sarà disposta nel « senso giusto » e non chiederà altro che di lasciar passare la corrente; ma l'altra sarà nel « senso contrario » e si opporrà al suo passaggio.

Ign. - Per esempio, se a un transistore *N-P-N*, noi applichiamo a sinistra il negativo ed a destra il positivo, la prima giunzione (*N-P*) lascerà passare facilmente gli elettroni da sinistra a destra.

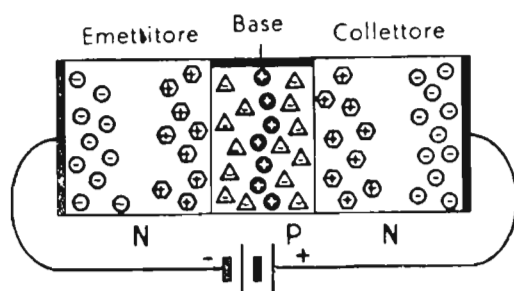



Fig. 22 - Barriere di potenziale che si frappongono in un transistore sul cammino degli elettroni, delle lacune, e degli ioni positivi (quelli dei donatori) e negativi (quelli degli accoglitori).

Ma la seconda (*P-N*) sbarrerà loro risolutamente la via. Non vi saranno però degli elettroni svagati che, malgrado tutto perverranno a circolare?

Cur. - Si, ve ne sono sempre, infatti. Si trovano la loro via sfruttando l'agitazione termica che permette loro di superare la barriera di potenziale della giunzione *P-N*. Questa circolazione di elettroni costituisce ciò che si chiama *corrente iniziale* o *corrente di saturazione*.

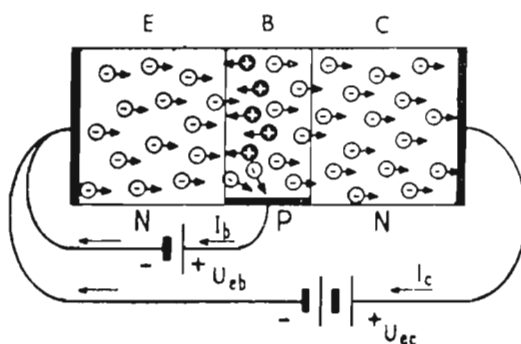
Ign. - Perchè quest'ultima denominazione? La corrente sarà talmente intensa?

Cur. - Al contrario: essa è debolissima. Ma non dipende affatto dal valore della tensione applicata. Aumentandola, la corrente resterà praticamente la stessa. Per « saturazione » si deve intendere che la totalità degli elettroni liberi, capaci, ad una data temperatura, di superare la barriera di potenziale, partecipano alla corrente così designata.

Ign. - Ma se la temperatura aumenta...

Cur. - ... l'intensità della corrente di saturazione aumenta anche essa. Può anche accadere che, sotto una tensione elevata, questa corrente raggiunga un valore tale da provocare il riscaldamento delle giunzioni, ciò che fa crescere ancor più la sua intensità...

Ign. - ... ciò che a sua volta aumenta il riscaldamento e così via.

Fig. 23 - Attirando gli elettroni dell'emettitore verso la base, la sorgente di tensione U_{eb}, ha aperto loro la via del collettore.

Cur. - Sì. Si dice allora che il transistore si è « imballato ». E questo fenomeno può provocarne la distruzione. Perciò conviene di non applicargli delle tensioni eccessive e di facilitare la dispersione del calore.

Ign. - Vi prometto di installare dei ventilatori nei miei apparecchi a transistori... Ma, detto tra noi, non vedo l'utilità di questi semiconduttori a forma di sandwich.

ALLA BASE DI TUTTO... LA BASE

Ign. - E' perchè non avete ancora toccato il prosciutto... voglio dire la sottile zona mediana, compresa fra le due giunzioni e che abbiamo chiamato « base ». Applichiamo ora una debole tensione, in senso diretto, fra l'emettitore e la base

Ign. - Volete dire che, per esempio, nel caso di un transistore *N-P-N,* noi renderemo l'emettitore negativo nei rispetti della base?

Cur. - Esattamente. Cosa si produrrà allora, a vostro parere?

Ign. - Nulla di speciale. Poichè la tensione è applicata nel senso giusto, si stabilirà una corrente attraversso la giunzione fra emettitore e base. Ed è tutto.

Cur. - No, non è proprio tutto. Perchè questa corrente introdurrà nella base *P,* degli elettroni liberi provenienti dall'emettitore che è del tipo N. E siccome la base è sottilissima, solo una piccola quanti-

tà di questi elettroni andrà a colmare le lacune disseminate nella zona *P*, creando così una *corrente di base* I_b secondo il meccanismo che abbiamo studiato l'ultima volta, esaminando la giunzione *N-P*. Comunque la massima parte di questi elettroni penetrando nella base proseguiranno il loro moto entro il collettore verso il potenziale positivo della sorgente U_{ec}. Essi supereranno quindi la barriera di potenziale della seconda giunzione ed attraversando il collettore, ritorneranno verso l'emettitore attraverso la sorgente di tensione U_{ec}.

Ign. - Magnifico! Se ben comprendo, è sufficiente applicare una piccola tensione fra base ed emettitore per far superare agli elettroni questa seconda giunzione base-collettore, che normalmente si presenta ad essi nel « senso contrario ».

Cur. - Ma sì, Ignoto. Ed è proprio lo stabilirsi della corrente inversa attraverso la seconda giunzione che rappresenta il principio stesso dell'*effetto transistore*.

Ign. - Penso che le cose saranno per me più chiare, se voi mi metterete al corrente sull'ordine di grandezza delle tensioni e delle correnti messe in giuoco.

Microampere della base e milliampere del collettore

Cur. - Fra base ed emettitore, nei transistori, si applica una tensione dell'ordine di 0,1 a 0,2 volt. Essa determina una corrente di base di 50 a 200 microampere (μA). Circa la tensione applicata fra collettore ed emettitore, essa può variare fra 4,5 e 9 volt. E la corrente del collettore è dell'ordine di 2 a 10 milliampere (mA).

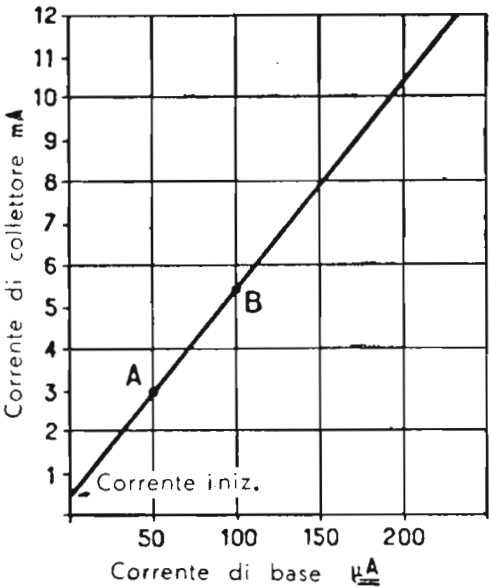
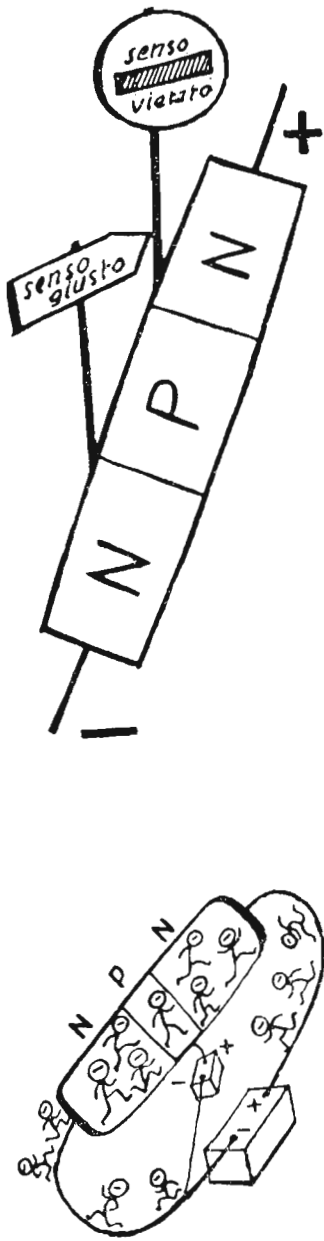



Fig. 24 - Variazione di corrente del collettore I_c (in milliampere) in funzione della corrente di base I_b (in microampere). Fra i punti *A* e *B*, la corrente di base passa da 50 a 100 μA, cioè un aumento di 50 μA ovvero 0,05 mA. La corrente di collettore fra questi due stessi punti, passa da 3 a 5,5 mA. Il guadagno in corrente del transistore, è quindi uguale a 2,5 : 0,05 = 50 volte.

Ign. - Insomma, l'emettitore fa entrare nella base un certo numero di elettroni, dei quali una piccola parte ritorna immediatamente attraverso la sorgente di tensione U_{eb}, verso l'emettitore. Sono gli elettroni che, nel loro breve tragitto nella base, hanno avuto la sfortuna di incontrare delle lacune. Ma la maggior parte proseguono il loro

cammino attraversando la seconda giunzione, e, entrati nel collettore, ritornano verso l'emettitore attraverso la sorgente di tensione U_{ec}. Indovino già che l'effetto amplificatore del transistore consiste nel fatto che la corrente del collettore è molto superiore a quella della base.

Cur. - Voi andate troppo velocemente, ma non avete tutti i torti. Il fatto è che la corrente di collettore dipende essenzialmente dalla corrente di base e varia in proporzione. In generale essa ne è parecchie decine di volte superiore. Ecco, per esempio, una curva che mostra come la corrente di collettore varia in funzione della corren-

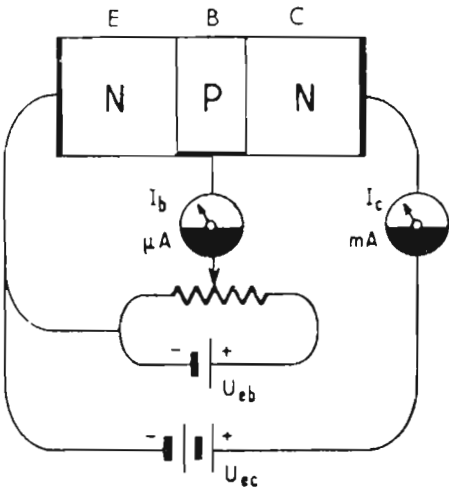



Fig. 25 - Montaggio per il rilievo della curva della fig. 24.
Per ogni posizione del potenziometro, si rilevano i valori delle correnti di base e di collettore.

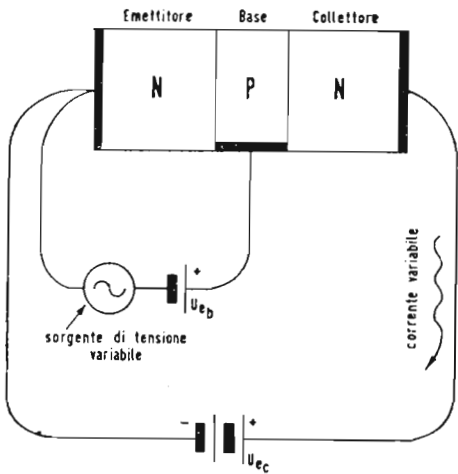
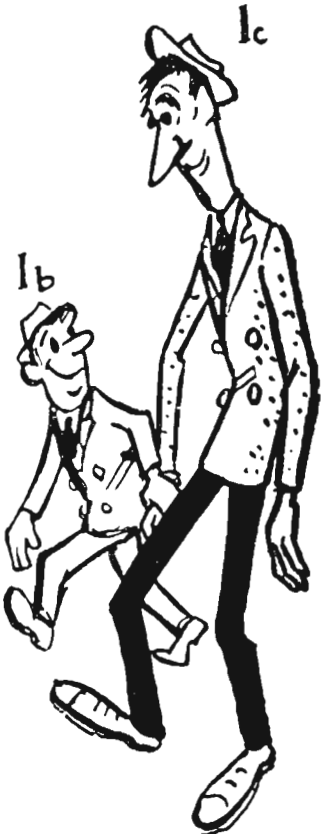
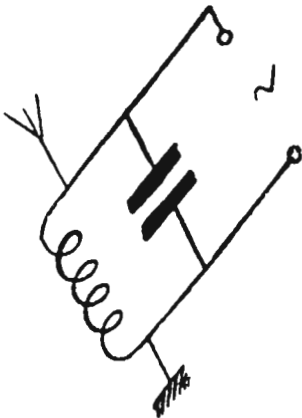



Fig. 26 - Ed ecco una tensione variabile applicata fra base ed emettitore. D'un tratto, la corrente di collettore diviene essa pure variabile.

te di base, in un certo tipo di transistori. Attenzione Ignoto! La corrente di base è qui rappresentata in microamperes, mentre quella di collettore è sempre cinquanta volte superiore a quella di base (astrazione fatta dalla debole corrente iniziale che esiste in assenza di corrente di base). Si dice allora che l'*amplificazione di corrente* è uguale a cinquanta.

Ign. - Come si rileva una tale curva?

Cur. - Rendendo variabile la tensione applicata fra base e emettitore, con l'ausilio, per esempio, di un divisore di tensione, volgarmente chiamato potenziometro. Si misura allora la corrente di base mediante un microamperometro, e quella del collettore mediante un milliamperometro.

Ign. - Ho un'idea, Curioso. Se invece di ruotare il bottone del potenziometro, si facesse variare la tensione fra emettitore e base, applicando in serie con la sorgente di tensione continua, un segnale variabile, per esempio la tensione ad alta frequenza proveniente da un collettore d'onde, oppure la tensione a bassa frequenza ottenuta dopo la rivelazione... Facendo così subire delle piccole variazioni alla corrente di base, si otterranno delle forti variazioni di corrente di collettore.

SIMILITUDINI E DIFFERENZE

Cur. - Bravo Ignoto! Voi bruciate le tappe delle mie spiegazioni. Come avete avuto questa idea luminosa?

Ign. - Perchè già da qualche momento, sto intravvedendo l'analogia fra il transistore ed il tubo elettronico. Questa base rassomiglia stranamente alla griglia. E come quest'ultima è interposta fra emettitore e collettore, cioè fra catodo (anch'esso emettitore di elettroni) ed anodo (anch'esso collettore di elettroni). Ed allo stesso modo che deboli variazioni di potenziale sulla griglia, provocano forti variazioni di corrente anodica, qui deboli variazioni di potenziale della base determinano delle forti variazioni di corrente di collettore. Evviva! Ho compreso il transistore!!! Non sono forse in gamba?

Cur. - Modestamente, sì. Però, a rischio di versare una doccia fredda sul vostro entusiasmo giovanile, devo dirvi che l'analogia tubo-transistore, pur facilitando grandemente la comprensione di certe cose, ha dei limiti che non si possono oltrepassare.

Ign. - Non vedo delle differenze essenziali.

Cur. - Per incominciare, ve n'è una rilevante: è l'esistenza della corrente di base. Ricordate? Quando utilizziamo i tubi a vuoto, noi evitiamo accuratamente di avere una corrente di griglia.

Ign. - Esatto. Noi polarizziamo negativamente la griglia per impedirle di divenire positiva nelle creste delle semionde positive del segnale, ciò che la renderebbe simile ad un anodo, raccogliendo così elettroni.

Cur. - Perciò il segnale d'ingresso di un tubo è una tensione che non deve creare alcuna corrente, e quindi non deve fornire alcuna potenza. Ma nel caso del transistore, il segnale d'ingresso è una tensione generante una corrente di base. Vi è dunque una potenza messa in giuoco.

Ign. - Devo concludere che la *resistenza d'ingresso* del transistore, cioè la resistenza emettitore-base, è piccola?

Cur. - Evidentemente. Esso non è che di qualche centinaio di ohm, mentre in un tubo a vuoto, fra il catodo e la griglia, è praticamente infinita. E nel transistore di potenza questa resistenza non è che di qualche ohm o decina di ohm. Per contro, la *resistenza d'uscita* è abbastanza elevata e può raggiungere parecchie decine di migliaia di ohm (1).

---

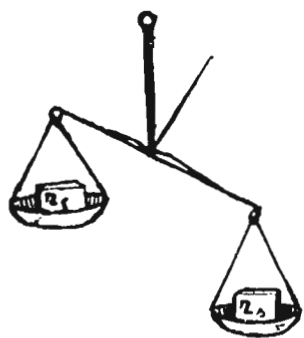
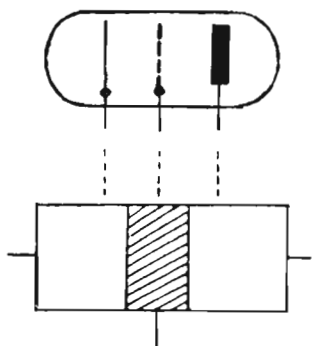
(1) Le resistenze alle quali accenna Curioso, sono calcolate dividendo una piccola variazione di tensione per la variazione di corrente corrispondente, ch'essa determina.

Così, la *resistenza d'entrata*

$$r_e = \frac{\Delta E_b}{\Delta I_b}$$

dove ΔE_b è una piccola variazione della tensione fra emettitore e base, e ΔI_b la variazione di corrente di base, risultante. Parimenti, la *resistenza d'uscita*

$$r_u = \frac{\Delta E_c}{\Delta I_c}$$

ove ΔE_c è una piccola variazione della tensione applicata fra collettore ed emettitore, mentre ΔI_c è la variazione corrispondente di corrente di collettore.

Ign. - Ciò è normale, poichè le tensioni sono applicate nel senso diretto, per la giunzione emettitore-base, ciò che ne riduce la resistenza, ma in senso inverso per la giunzione base-collettore, ciò che rende la sua resistenza molto elevata. In questo caso quindi, gli ordini di grandezza sono quelli dei tubi elettronici, ove la resistenza d'uscita è relativamente piccola, soprattutto nei triodi.

Cur. - Vedete dunque, Ignoto, che non si può ricorrere, senza qualche riserva, all'analogia tubo-transistore. E poichè noi abbiamo abbordato la questione fondamentale delle resistenze (o meglio, impedenze) d'ingresso e d'uscita, comprenderete facilmente come il transistore effettua l'amplificazione di tensione.

AMPLIFICAZIONE DI TENSIONE

Ign. - Suppongo che una debole tensione alternativa applicata fra base ed emettitore, determinerà delle variazioni di corrente di base, come abbiamo già detto.

Cur. E queste variazioni saranno tanto più importanti quanto più piccola sarà la resistenza d'entrata (supponendo che la sorgente di tensione abbia essa pure una piccola resistenza interna).

Ign. - Comprendo tutto ciò, perchè ho sempre presente la legge di Ohm, secondo la quale l'intensità di corrente è tanto più grande, quanto più piccola è la resistenza del circuito.

Cur. - Ora, la corrente del collettore varia proporzionalmente alla corrente di base. Ne risultano quindi delle forti variazioni di questa corrente. E poichè la resistenza d'uscita del transistore è elevata, noi possiamo senza inconvenienti, far passare questa corrente attraverso una resistenza di carico di elevato valore...

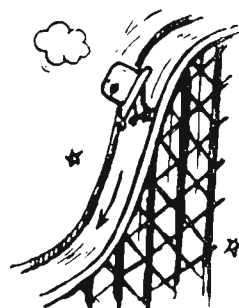
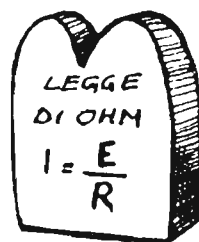
Ign. - ... sulla quale potremo così raccogliere delle tensioni alternative molto amplificate. Se la mia memoria è buona, nei tubi elettronici, il rapporto fra una piccola variazione di corrente anodica e la variazione di tensione di griglia che l'ha provocata, porta il nome di *pendenza.* E' possibile, nel regno dei transistori, applicare lo stesso concetto? La pendenza sarà allora il rapporto fra la variazione di corrente di collettore e la variazione della tensione di base.

Cur. - Ma sì, Ignoto. Si parla correntemente della pendenza di un transistore. Ed avremo l'occasione di nominare presto questa nozione, e già sin d'ora posso dirvi che una pendenza di 30 mA/V (per una corrente di collettore di 1 mA, perchè il suo valore varia con quello di questa corrente) non ha nulla di sorprendente.

Ign. - Ma è formidabile! Si devono ottenere delle amplificazioni enormi con una tale pendenza.

Cur. - Purtroppo no. Perchè, lo vedrete ben presto, la piccola resistenza d'ingresso, ci fa perdere una parte del beneficio di queste pendenze elevate. D'altra parte, voi comprendete che occorre limitare l'ampiezza delle tensioni alternative così messe i giuoco.

Ign. - Nei tubi a vuoto si deve evitare che la griglia divenga positiva. Qui, penso, occorre evitare che le creste delle semionde positive non rendano positivo l'emettitore nei rispetti della base.

Cur. - Non occorre inoltre che le creste delle semionde negative sulla resistenza di carico oltrepassino la tensione positiva applicata al collettore e lo rendano negativo.

Ign. - Per evitare questi pericoli, non si potrebbe accrescere il valore delle due tensioni d'alimentazione?

Cur. - Sarebbe imprudente in certi casi, perchè per ogni tipo di transistore, vi sono dei valori delle tensioni continue che non si devono superare. Ed a questo proposito, vi segnalo che le due sorgenti di tensione possono essere vantaggiosamente disposte in serie, poichè si tratta di portare il collettore a una tensione ancora più positiva di quella della base nei rispetti dell'emettitore.

Ign. - Capisco; la pila U_{eb} fa da scalino alla pila U_{ec}.

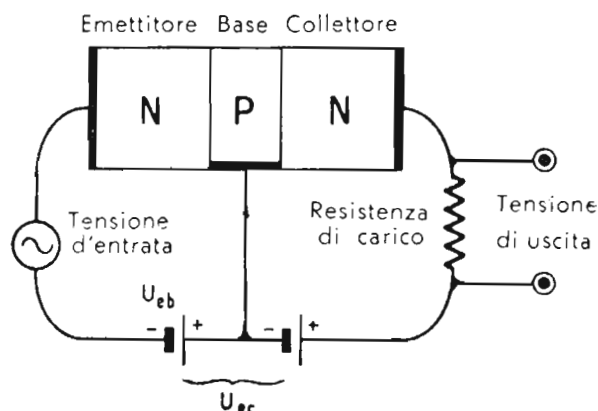
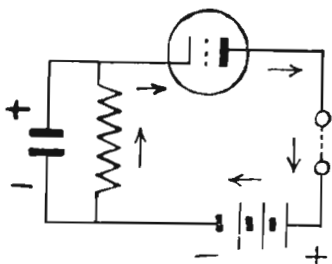



Fig. 27 - Le due sorgenti di tensione quella della base e quella del collettore, possono essere rimpiazzate da una sola, provvista di una presa o di un divisore di tensione. Lo schizzo mostra nello stesso tempo, l'inserzione della resistenza di carico sulla quale si prelevano le tensioni d'uscita.

Cur. - In realtà si può fare completamente a meno della prima di queste pile e si ottiene la polarizzazione della base, creando in una resistenza, una caduta di tensione da parte della corrente emettitore-collettore che la attraversa.

Ign. - Come si fa anche nei circuiti a tubi elettronici, ove la resistenza di polarizzazione di griglia è percorsa dalla corrente anodica.

Cur. - Sì. Ma noi esamineremo questa questione più tardi. In tale attesa ed a titolo di esercizio, vi chiederò di riflettere, prima del nostro prossimo incontro, sul modo di comportarsi del secondo tipo di transistore: il *P-N-P*, che è di gran lunga il più diffuso.

Ign. - Che prospettiva di notti bianche, povero me!

QUARTA CONVERSAZIONE

Nel corso delle loro tre prime conversazioni, Curioso e Ignoto hanno esaminato le basi fisiche dei transistori. A questo scopo essi hanno esplorato la struttura intima dell'atomo, poi il suo comportamento sociale nelle reti cristalline.
Essi hanno visto quali fastidi sono causati in queste società d'atomi, dall'intrusione delle impurità. Inoltre, raggruppando dei semiconduttori contenenti delle impurità di proprietà opposte, i nostri amici hanno ottenuto dei diodi e dei transistori.
Tutto questo, per poter essere ben assimilato, merita un riepilogo, accurato. E ciò sarà l'oggetto di questa conversazione.

SOMMARIO: Moto delle cariche — Portatori preminenti — Funzionamento del transistore P-N-P *— Combinazioni intermetalliche — Tracciamento dei collegamenti — Simboli del transistore — Riassunto delle nozioni fondamentali.*

LA FISICA DEI TRANSISTORI

QUATTRO TIPI DI PARTICELLE CARICATE

Ignoto. - I vostri semiconduttori mi fanno passare delle notti bianche, caro Curioso. E' una cosa appassionante, ma terribilmente complicata!

Curioso. - Devo somministrarvi dei sonniferi, oppure preferite che vi chiarisca i punti che vi appaiono più oscuri?

Ign. - Preferisco avere delle risposte agli interrogativi che mi tormentano. Ecco, ciò che mi rende confuso l'aspetto di certi fenomeni, è la presenza nei semiconduttori di quattro specie di particelle caricate:

1) *Gli atomi ionizzati dei donatori,* che dopo avere preso il quinto elettrone del loro strato esterno, sono divenuti *positivi;*

2) Gli elettroni così liberati che ovviamente sono *negativi;*

3) Gli atomi ionizzati degli accoglitori, che avendo accapparrato un elettrone d'un atomo vicino, per completare a quattro il loro strato esterno, sono per questo divenuti *negativi;*

4) Infine, questi *buchi* o *lacune,* dovuti a tali accapparramenti; e dove la mancanza di un elettrone equivale ad una carica *positiva.*

Cur. - Avete riassunto benissimo la situazione che esiste in seno ad un semiconduttore. Cos'è dunque che vi inquieta?

Ign. - E' la questione dei movimenti delle cariche. Voi mi avete detto che la corrente elettrica, nel semiconduttore, è dovuta, sia al flusso degli elettroni migranti del polo negativo verso il polo positivo,

che allo spostamento delle « lacune », le quali, in senso inverso, vanno dal polo positivo verso il polo negativo.

In ciò, i semiconduttori differiscono dai metalli, ove la conduzione è dovuta unicamente al movimento degli elettroni.

Cur. - Esattissimo; sebbene il movimento delle « lacune » sia anch'esso, in ultima analisi, dovuto allo spostamento degli elettroni.

Ign. - Ma non comprendo perchè gli atomi ionizzati, sia quelli dei donatori, che quelli degli accoglitori, non partecipino anch'essi al movimento delle cariche elettriche.

Cur. - Vedo ora ciò che vi preoccupa. Ed avete anche ragione di porre la domanda. E' comunque molto semplice: questi atomi non possono spostarsi, perchè essi fanno parte di una rete cristallina e per questo motivo, sono solidamente e rigidamente attaccati ai loro posti. Sino a che un capo resta solido, i suoi atomi rimangono prigionieri di questi legami invisibili che li mantengono al loro posto. Per contro, nei liquidi, gli atomi ionizzati si spostano liberamente, e la corrente si propaga per conduzione ionica, dando luogo a dei fenomeni di elettrolisi, dei quali si è senza dubbio occupato il vostro Corso di Fisica.

Ign. - Bene; ciò che mi dite, mi fa piacere. Ormai nei miei ragionamenti potrò quindi fare astrazione dagli atomi ionizzati, ed occuparmi degli elettroni e delle lacune.

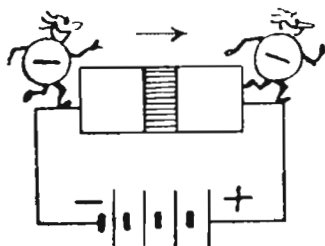
Cur. - Ciò è perfettamente legittimo. Ed aggiungerò che è bene che gli ioni non si spostino nei semiconduttori. Altrimenti vi si verificherebbe, a poco a poco, un esaurimento di materia conduttrice, ciò che abbrevierebbe la vita dei transistori. Per contro, la provvista di elettroni si rinnova costantemente, poichè la sorgente di tensione ne inietta da un lato e ne assorbe dall'altro (ciò che provoca delle nuove « lacune »). Ciò equivale a dire che nulla insorge a limitare la longevità dei transistori.

EINSTEIN AVEVA « RAGIONE »

Ign. - Ma è meraviglioso... Piuttosto non abbandoniamo i nostri elettroni e lacune. Vorrei sapere come essi coesistono senza neutralizzarsi tra di loro. Poichè le cariche di nome contrario si attirano naturalmente...

Cur. - Pensate, Ignoto, alle enormi distanze che (nella scala atomica, beninteso) separano la maggioranza di queste particelle. Un elettrone perviene a percorrere dei tragitti di una lunghezza uguale a molte centinaia di volte la distanza che separa degli atomi fra di loro. Non è che un decimillesimo di millimetro in media, nella scala umana. Ma per un elettrone è un'avventura altrettanto folle che un viaggio interstellare di un futuro razzo spaziale. Voi capite quindi, che in queste condizioni, le possibilità di incontrare una « lacuna », non sono affatto enormi. Infatti gli elettroni e le lacune, coesistono sempre.

Ign. - Già, voi mi avete spiegato che, anche a temperatura normale, vi è una certa agitazione termica che strappa degli elettroni a numerosi atomi, per proiettarli nello spazio interatomico.

Cur. - In un centimetro cubo di germanio « puro », vi sono sempre qualche venticinquemila miliardi di elettroni liberi ed evidentemente altrettante « lacune », poichè il posto lasciato da un elettrone

è una « lacuna ». Queste coppie di portatori di cariche si ricombinano dopo una certa durata di vita, ma viene a stabilirsi un equilibrio statistico.

Ign. - E se il germanio non è « puro »? Se vi introduciamo, per esempio, delle impurità di tipo *N*?

Cur. - Vi saranno allora più elettroni liberi che lacune. E questi elettroni costituiranno dei *portatori di cariche preminenti.*

Ign. - Indovino che in un semiconduttore di tipo *P*, saranno le « lacune » in maggior numero, che perciò dovranno essere considerate come *portatori preminenti...* Decisamente Einstein aveva ragione. Tutto è relativo e tutto è solo una questione di proporzioni.

IL MECCANISMO DEL P-N-P

Cur. - Ora che ho soddisfatto la vostra curiosità, potreste a vostra volta, rispondere alla domanda che vi ho fatto alla fine della nostra ultima conversazione: come funziona il transistore *P-N-P?*

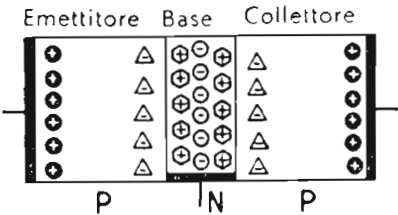



Fig. 28 - Ripartizione dei portatori di cariche (elettroni e lacune) e degli atomi ionizzati in un transistore *P-N-P* prima dell'applicazione delle tensioni d'alimentazione. Si distinguono le barriere di potenziale formate da ioni di segno opposto.

Ign. - Vi ho riflettuto e credo di potervelo dire. In un tale transistore, contrariamente a quanto si fa per il *N-P-N,* il collettore dovrà essere reso negativo nei rispetti dell'emettitore. Vi confesso che ciò mi è molto sgradevole.

Cur. - Perchè poi?

Ign. - Perchè ho la tendenza a paragonare sempre il transistore ad

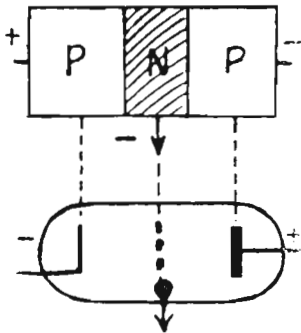
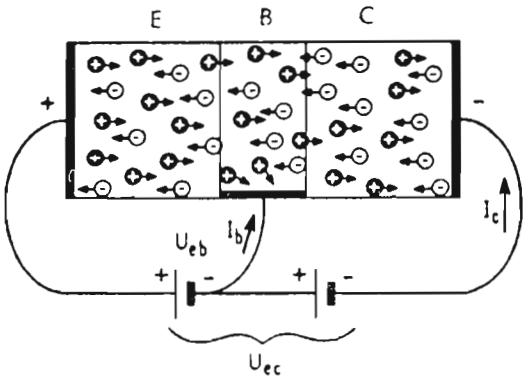
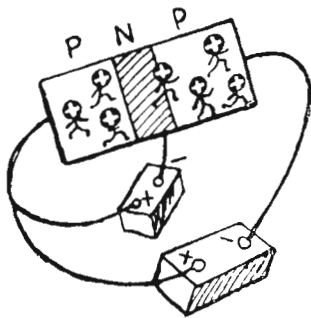



Fig. 29 - Movimento dei portatori di cariche in un transistore *P-N-P* in funzionamento. Per maggiore chiarezza gli ioni non appaiono nel disegno.

un triodo... E l'idea di un anodo reso negativo, nei rispetti del catodo, poichè tali sono i ruoli rispettivi del collettore e dell'emettitore, questa idea mi turba alquanto. Per contro, il sapore che la base deve essere anch'essa negativa nei rispetti dell'emettitore, solleva il mio spirito, poichè penso, ovviamente, alla griglia.

Cur. - Diffidate, Ignoto, da questi accostamenti, ve l'avevo già detto.

Ign. - Comunque, con delle tensioni così ripartite, la giunzione emettitore-base, è alimentata nel senso giusto. Vale a dire che, respinte dal polo positivo della sorgente d'alimentazione, le « lacune », dell'emettitore si precipiteranno impetuosamente, attraverso la giunzione *P-N*, verso la base. Ed il loro slancio sarà tale che, incapaci di rispondere all'appello del polo negativo della batteria U_{eb}, collegata alla base, la maggior parte attraversano il suo piccolo spessore per penetrare nel collettore.

Cur. - Tutto ciò è esattissimo. Ma cosa accade alle poche « lacune » che, come avete detto, rispondono all'appello del polo negativo della batteria U_{eb}?

Ign. - Quelle vengono neutralizzate ricombinandosi con gli elettroni emananti da questo polo. E danno altresì luogo ad una debole corrente I_b, circolante dalla base verso l'emettitore (nel senso elettronico, beninteso).

Cur. - E qual'è la sorte della maggioranza delle « lacune » che hanno raggiunto il collettore?

Ign. - Anche in questo caso si verifica lo stesso fenomeno: esse sono neutralizzate dagli elettroni emananti dal polo negativo della batteria U_{ec}, che le chiama irresistibilmente. Ed ogni volta che un elettrone sarà così penetrato dalla batteria nel collettore, per combinarsi con una « lacuna », un altro elettrone lascierà uno degli atomi dell'emettitore, per essere aspirato dal polo positivo di questa batteria; e naturalmente tale elettrone lasciando il suo atomo, dà luogo ad una nuova « lacuna » Ed in questo modo la corrente viene mantenuta a causa della circolazione di « lacune » dell'emettitore verso il collettore e di elettroni in senso inverso. E' esatto?

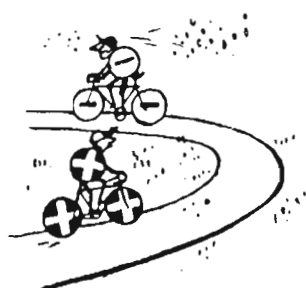
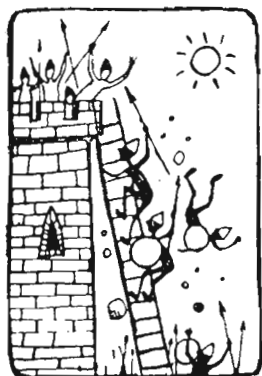
Cur. - Sono stupefatto nel constatare che avete perfettamente afferrato il meccanismo del transistore. Effettivamente tutto avviene come quando un'armata intraprende l'assalto d'una fortezza. I combattenti raggiungono gli spalti e li superano in uno slancio irresistibile, forzando i ranghi dei difensori che tentano di contenerli.

Ign. - La vostra analogia, nella quale lo spalto rappresenta la base e la fortezza il collettore, sarebbe più convincente se la guarnigione assediata tentasse un contrattacco simbolizzante il movimento degli elettroni incontro alle « lacune » assalitrici, la cui carica è... positiva e irresistibile. Ed a questo proposito, gli elettroni e le lacune sono animati dalla stessa velocità?

ALCUNE COMBINAZIONI FUTURISTICHE

Cur. - No, caro Ignoto. Nel germanio puro, sotto l'azione di un campo elettrico di un volt per centimetro, gli elettroni percorrono una quarantina di metri al secondo, mentre le lacune si spostano due volte più lentamente. Nel silicio, la velocità degli elettroni è, nelle stesse condizioni, di dodici metri al secondo, e quella delle lacune di soli due metri e mezzo al secondo. Per contro, in certe combinazioni *intermetalliche*, gli elettroni raggiungono una velocità di più di mezzo chilometro al secondo.

Ign. - Cosa sono queste combinazioni intermetalliche che mi mettete improvvisamente sotto il naso?

Cur. - Sono dei semiconduttori ottenuti mediante una combinazione di elementi trivalenti e pentavalenti...

Ign. - ... ciò che significa, in media, fra tre e cinque, degli elementi di valenza quattro, cioè tetravalenti come il germanio ed il silicio. Potete nominarne qualcuno?

Cur. - Sì. Per esempio la combinazione del gallio trivalente e dell'antimonio pentavalente, che permette di realizzare dei transistori. Oppure l'indio trivalente, combinato con del fosforo pentavalente, forma un semiconduttore utilizzato in certi diodi. Si è pure riusciti a realizzare una combinazione di cadmio (valenza due) e di selenio (valenza sei) per fare delle cellule fotoelettriche. Il dominio dei semiconduttori intermetallici è l'oggetto di intense ricerche ed apre interessanti prospettive future.

Ign. - Voi parlate come un libro, caro amico. Ma ritorniamo al presente ed alle nostre pecore... a tre gambe. Vorrei sapere come si differenzia un emettitore da un collettore. In un transistore *P-N-P*, entrambi sono del tipo *P* (come in *N-P-N*, entrambi del tipo *N*). Allora essi non sono affatto intercambiabili.

Cur. - No, caro amico. E lo capirete anche facilmente. Se la corrente diretta dall'emettitore verso la base e poi da qui verso il collettore, è sensibilmente la stessa, le tensioni sono molto diverse. De-

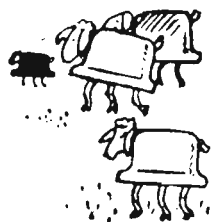
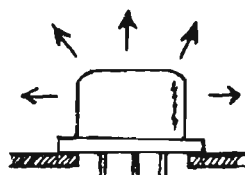
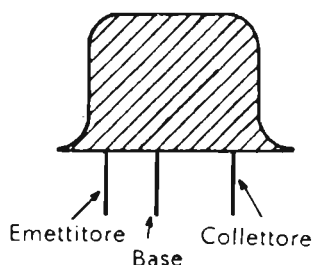



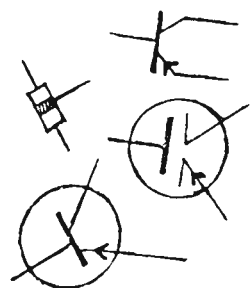
Fig. 30 - Disposizione delle tre « zampe » di un transistore, in modo da permettere il reperimento agevole dell'emettitore, della base e (più lontano) del collettore.

bole fra base ed emettitore, la tensione è ben più elevata fra collettore e base.

Ign. - Ci sono. Poichè il prodotto di una corrente per una tensione rappresenta una potenza, quella dissipata dal lato del collettore è parecchie volte superiore a quella che si riscontra fra collettore e base.

Cur. - Avete perfettamente ragione. Ecco perchè il collettore deve potere più facilmente dissipare il calore generato. La sua superficie è più grande di quella dell'emettitore. E nei transistori di potenza, il collettore è saldato all'involucro metallico, ciò che consente di asportare il calore e di trasmetterlo per conduzione al telaio metallico del circuito elettronico.

Ign. - Comprendo ora come si differenziano gli elettrodi del transistore. Ma come è possibile riconoscerli? Come si fa a sapere che quella tale connessione del transistore comunica col suo emettitore, che tal'altra corrisponde alla sua base od al suo collettore?

DELLE ZAMPE E DELLE PUNTE

Cur. - L'identificazione è molto facile. I tre fili (poichè il minuscolo transistore non ha nè zoccolo nè piedini) sono disposti in fila. Due fili sono ravvicinati: sono l'emettitore e la base. Il terzo, più distante, è quello del collettore (questo può anche essere riconosciuto da un punto di colore).

Ign. - Mi sembra semplice e logico come quel simbolo del transistore che vedo nei vostri schemi: uno bastoncino diviso in tre zone.

Cur. - Ahimé! Ignoto, questo simbolo che effettivamente è logico e corrisponde alla reale struttura del transistore, non è affatto quello che si usa abitualmente negli schemi.

Ign. - Peccato! E qual'è allora il simbolo grafico « ufficiale » che rappresenta il transistore?

Cur. - Purtroppo non vi è un simbolo adottato universalmente: esso varia da un paese all'altro e talvolta da un autore all'altro. Ma la maggior parte hanno questa forma: un trattino con due altri che lo vanno a colpire al centro.

Fig. 31 - Simboli frequentemente usati per i transistori dei tipi *P-N-P* e *N-P-N*.

Il primo tratto è la base. Quello che lo tocca al centro e che è munito di una freccia è l'emettitore. L'altro è il collettore. E, ricordatelo bene, quando la freccia è orientata *verso* la base, è il tipo *P-N-P*. Se essa *parte* dalla base, è un *N-P-N*.

Ign. - Ma perchè mai si è adottato un simbolo così poco conforme alla vera costituzione del transistore, ove l'emettitore ed il collettore si trovano da parti opposte della base?

Cur. - E' l'eredità dell'epoca preistorica che risale al 1948. I primi transistori che facevano la loro entrata nel mondo, erano del tipo a « punta ».

Essi erano formati da un cristallo di germanio del tipo *N*, che fungeva da base, sul quale si appoggiavano delle punte metalliche, molto vicine l'una all'altra.

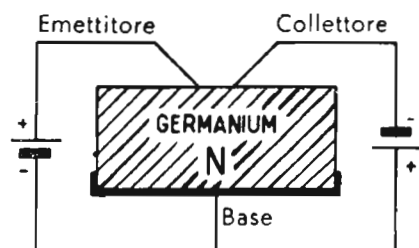



Fig. 32 - Costituzione del transistore a punte.

Ign. - Ma, Curioso, non era forse un ritorno verso il vecchio « detector » a galena?

Cur. - Quasi. Ma in luogo di un solo « baffo » di contatto, ve ne erano due. E si alimentava questo transistore come un attuale modello *P-N-P*. Il difetto fondamentale del transistore a punte è la mancanza di stabilità, esattamente come quello del suo antenato, il detector a galena. Inoltre non permette di mettere in giuoco delle potenze appena importanti.

Ecco perchè non ce se ne serve più (mentre però il diodo a punte è ancora utilizzato, particolarmente nel campo delle frequenze

molto elevate, come quelle dei radar, poichè la bassissima capacità ch'esso presenta è molto apprezzata).

Ign. - Insomma il simbolo attuale è il ricordo di un'epoca superata.

Cur. - Proprio così. Vogliate notare tuttora, che allo scopo di distinguere il transistore a punte dal tipo attuale a giunzione, parecchi autori usano per quest'ultimo un simbolo speciale.

Fig. 33 - Simboli dedicati più particolarmente ai transistori a giunzione.

Ign. - Prima di proseguire, Curioso, vorrei chiedervi di riassumere brevemente per me, preferibilmente per iscritto, i concetti essenziali che mi avete sin qui esposti, e dei quali avrò bisogno per comprendere il seguito delle vostre spiegazioni. Ciò mi permetterà di assimilarle meglio prima del nostro prossimo incontro.

Cur. - Scriverò volentieri questo riassunto e ve lo invierò per posta. Frattanto, buona notte, Ignoto.

LETTERA DI CURIOSO A IGNOTO

Ecco, mio caro amico, le cose che dovete imprimere nella vostra memoria:

1) *Un transistore si compone di tre zone chiamate emettitore, base e collettore. Esse contengono delle impurità che conferiscono all'emettitore ed al collettore delle proprietà elettriche (positive* P *o negative* N).

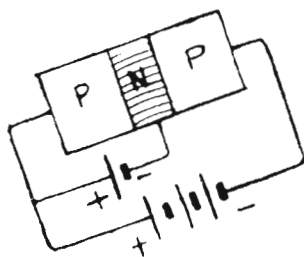
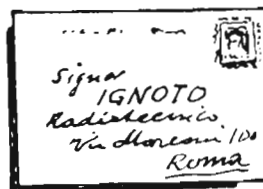
2) *Esistono due categorie di transistori*: P-N-P *e* N-P-N. *La prima è la più diffusa, almeno nel caso del germanio. (Per delle ragioni tecnologiche, la maggior parte dei transistori al silicio sono del tipo* N-P-N.

3) *Nel tipo* P-N-P, *la base deve essere resa negativa nei rispetti dell'emettitore ed il collettore deve essere ancor più negativo della base.*

4) *Nel tipo* N-P-N, *la base è più positiva dell'emettitore ed il collettore ancor più positivo della base.*

5) *Si noti che in entrambi i casi le tensioni applicate alimentano la giunzione emettitore-base nel senso della conduzione.*

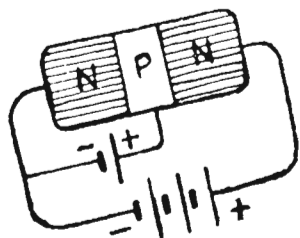
6) *La corrente di base è molto debole (dei microampere). Quella di collettore è molto più intensa (dei milliampere).*

7) *Una debole variazione della corrente di base determina una forte variazione della corrente di collettore. Il rapporto di quest'ultima alla prima è chiamato « amplificazione di corrente ».*

8) L'entrata del transistore (base-emettitore) presenta una resistenza relativamente piccola. Pertanto i segnali applicati all'entrata devono dissipare una certa potenza.

9) L'uscita del transistore (collettore-emettitore) presenta una resistenza elevata.

10) Una variazione di tensione applicata fra base ed emettitore determina una variazione di corrente di base; questa provoca una più forte variazione della corrente di collettore. E se nel circuito del collettore è inserita una resistenza di carico, vi si possono raccogliere delle variazioni di tensione amplificate.

Ecco, mio caro Ignoto, in poche parole, le conclusioni alle quali noi siamo giunti.

Il vostro devoto amico
CURIOSO

QUINTA CONVERSAZIONE

Certamente Ignoto non si costruirà lui stesso dei transistori.
Egli ha però tutto l'interesse a conoscere i procedimenti, molto interes santi, che permettono di realizzare le nostre "bestie a tre zampe".
Cammin facendo egli constaterà inoltre che ne esistono diverse varietà create per meglio aderire ai diversi compiti ad esse affidati.
E' in questo modo che i problemi di frequenze e di potenze sempre maggiori hanno spinto i tecnici ad adottare certe speciali soluzioni.

★ *SOMMARIO: Purificazione per fusione di zone — Riscaldamento elettronico — Fabbricazione di un monocristallo — Suo taglio — Metodo delle giunzioni in pasta — Transistori in lega — Il problema dei transistori di potenza — Processo di diffusione — Tempi di transito — Ruolo della capacità emettitore-collettore — Transistore-tetrodo — Transistori a strato di sbarramento — Metodo della doppia diffusione — Transistori "drift" — Tipo* P-N-I-P *— Transistori "mesa" — Dispositivi ad effetto di campo.*

UN PO' DI TECNOLOGIA

PURIFICAZIONE INIZIALE

Ignoto. - Voi sapete, Curioso, che io non ho mai tentato di costruirmi dei tubi elettronici. La necessità del vuoto spinto nell'interno dell'ampolla è sempre stato per me un ostacolo insormontabile, poichè la pompa della bicicletta non mi sembrava l'utensile più adatto... Per contro, penso di potere senza difficoltà costruirmi qualche transistore per mio uso. Credete che potrei trovare in farmacia gli ingredienti dei quali avrei bisogno: del germanio puro, dell'antimonio per la zona N e dell'indio per *P*?

Curioso. - Mio povero amico, parlate seriamente?

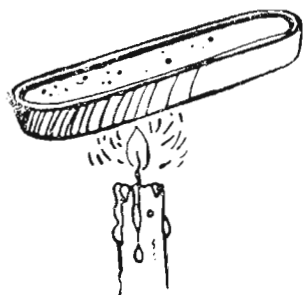
Ign. - Ma sì. E' così difficile?

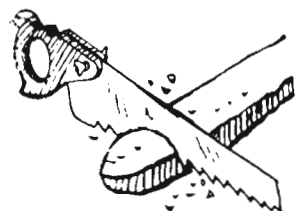
Cur. - E come!... Dapprima occorre purificare sufficientemente il germanio, poichè quello che viene venduto in commercio (sotto la qualifica di « puro »), non lo è abbastanza per noi. In seguito occorre conferirgli la struttura cristallina regolare trasformandolo in un cristallo unico o *monocristallo*. Poi occorre introdurre le impurità di tipo ***P*** e ***N***, creando le due giunzioni che separano le tre zone, montare rigidamente il tutto e proteggerlo racchiudendolo in un astuccio stagno. Solamente le grandi fabbriche perfettamente equipaggiate possono realizzare correttamente tutte queste operazioni.

Ign. - Voi mi scoraggiate. E' veramente così difficile purificare il germanio?

Cur. - Non dimenticate che noi abbiamo bisogno di un germanio veramente puro, ove su un miliardo di atomi non vi devono essere più di 10 atomi d'impurità, ed ancor meno in certi casi.

Ign. - Suppongo che vengono impiegati dei procedimenti chimici per sbarazzare il germanio dei corpi estranei che lo inquinano.

Cur. - La chimica fa quello che può. Ma è insufficiente. Perciò si ricorre ad un procedimento fisico chiamato *fusione per zone*, ove la elettronica ha qualcosa da dire. Si mette il germanio da purificare in un lungo crogiolo tersissimo, di quarzo o di grafite, ed in una atmosfera d'idrogeno o d'azoto (per evitare ogni ossidazione), si riscalda una stretta zona di germanio facendola fondere. E questa zona di fusione viene lentamente spostata da un'estremità all'altra del crogiolo.

Ign. - Suppongo che in tal modo, le impurità siano bruciate.

Cur. - Vi sbagliate, invece. Il procedimento è basato sul fatto che le impurità tendono a restare nella zona liquefatta, lasciando così le parti del germanio che raffreddandosi, cominciano a solidificarsi. Le si fa così, poco a poco, passare da un'estremità all'altra della massa del germanio, e dopo aver ripetuto l'operazione parecchie volte, si taglia l'estremità del germanio verso la quale sono state raccolte le impurità.

Ign. E la si getta via?

Cur. - No. Perchè il germanio costa carissimo. Esso viene riutilizzato in un'altra fusione di purificazione.

Ign. - Ebbene, ciò mi fa pensare che ieri noi abbiamo fatto subire a Gora una fusione a zone...

Cur. - Ma chi è Gora e cos'è la sciocchezza che voi mi state raccontando?

Ign. - Gora è la gatta (la chiamiamo così perchè essa è a metà angora). Generalmente pulitissima, a causa di qualche cattiva compagnia, essa si è riempita di pulci. Passando parecchie volte un pettine dalla testa alla coda, l'abbiamo sbarazzata dalle sue impurità... Ma come è costituito il pettine per il germanio? Voglio dire, in qual modo si perviene a fonderne solamente una zona ristretta?

RISCALDAMENTO ELETTRONICO

Cur. - Impiegando il riscaldamento per induzione ad alta frequenza. Un avvolgimento di alcune spire circonda la zona di fusione. Esso è percorso da una intensa corrente ad alta frequenza che induce nella massa del germanio delle correnti che generano un calore sufficiente per farlo fondere.

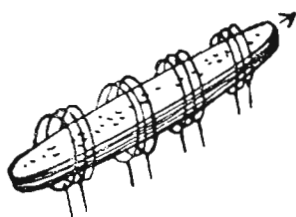
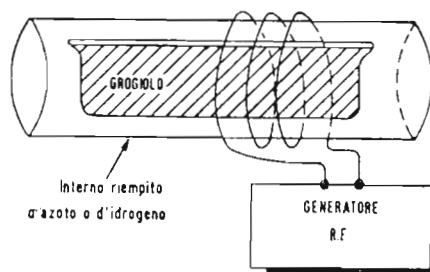
Ign. - Ma è esattamente quello che si fa allo zio Giulio!

Cur. - Cosa c'entra ora lo zio Giulio? Ha avuto anche lui delle pulci?

Ign. - No, ma un'infiammazione da sinovite al ginocchio, a seguito di una malaugurata caduta. Perciò gli si pratica della diatermia ad alta frequenza.

Cur. - Capisco. Si pone il ginocchio fra due elettrodi ben isolati, ai quali si applicano delle tensioni ad alta frequenza. Il campo *elettrico* così creato, sviluppa del calore per perdite nel dielettrico, nell'interno dell'organo malato. Ma nel riscaldamento per induzione utilizzato per la fusione a zone, è il campo *magnetico* generato dalle correnti nella massa del semiconduttore. Ciò che è da notare nell'azione del riscaldamento ad alta frequenza, sia che si tratti di cam-

pi elettrici (utilizzati per gli isolanti), che di campi magnetici (utilizzati per i materiali conduttori), è che il calore si sviluppa in tutta la *massa del corpo*, e non penetrandovi per conduzione termica, dalla superficie verso l'interno, come avviene nella cottura di una buona bistecca ai ferri...

Fig. 34 - Si realizza la fusione per zone riscaldando il germanio contenuto nel crogiolo, mediante correnti ad alta frequenza circolanti nella bobina che si sposta lentamente da un'estremità all'altra del crogiolo.

Ign. - Insomma, per ritornare al nostro germanio, la bobina passa lentamente da un'estremità all'altra del crogiolo...

Cur. - ... a meno che non sia il crogiolo a passare lentamente lungo l'asse di una bobina fissa, ciò che è lo stesso. In pratica, si dispongono diverse bobine spaziate, in modo da ottenere in un unico passaggio diverse zone di fusione alternate con zone di solidificazione. E' come se si facesse passare diverse volte una sola zona di fusione lungo il crogiolo. Aggiungendo che il moto del crogiolo è molto lento: un millimetro al minuto.

Ign. - E cosa si fa per il silicio?

Cur. - La stessa cosa, ma ad una temperatura più elevata, poichè se il germanio fonde a 940° C, il silicio esige 1420° C.

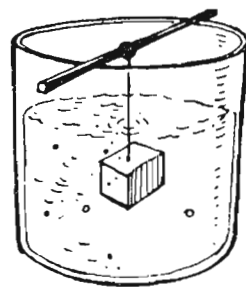
DOPO LA PURIFICAZIONE, CRISTALLIZZAZIONE

Ign. - E perchè non si può utilizzare direttamente il semiconduttore così purificato, per la costruzione dei transistori? Non è forse già cristallizzato?

Cur. - Lo è infatti. Ma non come vorremmo. Si tratta di un assieme di cristalli disposti in disordine. Mentre a noi occorre una rete cristallina perfettamente regolare e della quale conosciamo l'orientamento. Questo l'otteniamo facendo crescere attorno ad un piccolo cristallo chiamato « germe », una rete cristallina unica che viene chiamata « monocristallo ».

Ign. - Mi divertivo anch'io a fare così dei bei cristalli, mettendo in un bicchiere, del sale da cucina sciolto in acqua e lasciandovi immerso un filo all'estremità del quale attaccavo un minuscolo cristallo di sale. In otto giorni, un bel cubo trasparente vi si formava attorno. E' così che si procede per i semiconduttori?

Cur. - Il principio è il medesimo. Ma in luogo di una soluzione, si utilizza la materia allo stato di fusione. Vi si immerge il germe fissato all'estremità inferiore di un'asticciola. Questa ruota attorno al suo asse e nel contempo, sale molto lentamente.

Così, attorno al germe si vengono ad ordinare secondo la struttura della rete cristallina, degli atomi di germanio (o di silicio). La

materia si solidifica circondando il germe. Si ottiene così, nel giro di qualche ora, una barra del diametro di alcuni centimetri, lunga 20 a 30 cm e del peso di qualche chilogrammo. Se ne fanno delle migliaia di transistori.

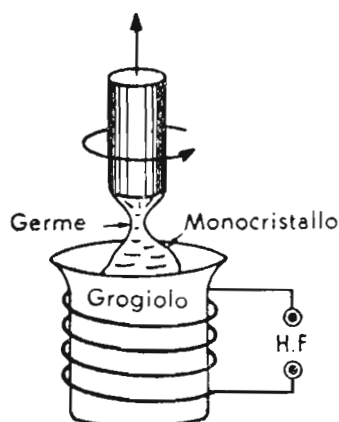
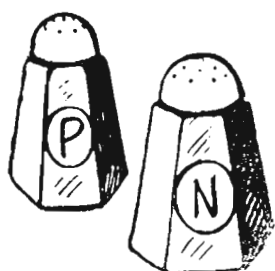



Fig. 35 - Confezione del monocristallo. La massa del semiconduttore contenuta nel crogiolo viene portata a fusione mediante il riscaldamento ad induzione ad alta frequenza.

Ign. - Insomma, questo monocristallo è un semiconduttore di grande purezza?

Cur. - No. Avevo omesso di dirvi che nella massa in fusione, che serve alla confezione del monocristallo, si aggiungono delle impurità di tipo *P* o *N*, a seconda che la base dovrà essere dell'uno o dell'altro di questi tipi. Poichè è la base che, generalmente, nelle ulteriori fasi di fabbricazione, conserva il carattere del monocristallo.

ED ORA UN PO' DI MECCANICA

Ign. - Voi mi dicevate che da un solo monocristallo si ottenevano delle migliaia di transistori. Devo supporre che lo si spezzetta in piccole particelle?

Cur. - Sicuro. Per incominciare, come un volgare salame, esso è tagliato in fettine o sottili lamine di 0,1 a 2 millimetri di spessore Sono delle seghe circolari a punte di diamante che fanno questo lavoro di precisione. Si utilizzano anche delle seghe a nastro, costituite da fili di tungsteno provvisti di un rivestimento abrasivo. Poi ogni lamina è a sua volta tagliata in piccoli quadratini aventi ciascuno qualche millimetro di lato.

Una tale piastrina delle dimensioni di 2 × 2 mm e 0,5 mm di spessore, non pesa che qualche centesimo di grammo. E' quanto dirvi che un monocristallo di 5 kg permetterebbe teoricamente di farne un mezzo milione! In realtà, vi sono alquante perdite nella fabbricazione, e lo scarto riduce la quantità dei pezzi finalmente ottenuti.

METODO DEI VELENI ALTERNATI

Ign. - Non è comunque mica male, anche se se ne perde la metà. Ma in che modo su queste basi si perviene a fabbricare dei transistori completi?

Cur. - Inquinando le loro due facce con delle impurità di tipo contrario di quello della piastrina.

Per esempio, se questa è del tipo *N* si introducono delle impurità del tipo *P* dai due lati, in modo da formare un emettitore e un collettore d'un transistore *P-N-P*.

Ign. - Ho un'idea, Curioso. Perchè non fabbricare dei transistori già pronti, nel corso della preparazione del monocristallo. Si potrebbe per esempio, all'inizio della preparazione, gettare nella massa fusa del semiconduttore, delle impurità di tipo *P*, come dell'indio. Poi, dopo avere così formato una zona *P* distinta dalla massa, vi si getterebbero delle impurità *N*, per esempio dell'arsenico. E si otterrebbe una zona *N*. La sopra, si aggiungerebbe sufficiente indio affinchè gli accoglitori divengono portatori principali, ciò che ci darebbe una nuova zona *P* e così di seguito. In definitiva, noi otterremmo una sbarra di germanio ove le zone *P* ed *N* si alternerebbero. Sarebbe sufficiente tagliare questa sbarra in porzioni, nel mezzo delle zone *P* per avere dei transistori *P-N-P*, ovvero nel mezzo delle zone *N* se si volessero avere dei *N-P-N*.

Confessate Curioso, che ho talvolta delle idee geniali.

Cur. - Ciò che ammiro soprattutto in voi è la modestia... Ahimè, caro mio, la vostra idea non ha nulla di inedito. Questo sistema di

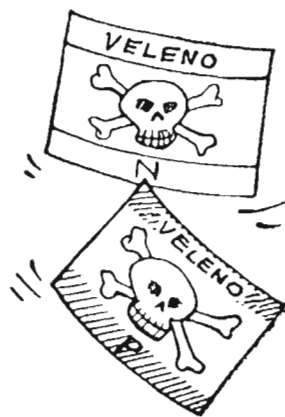
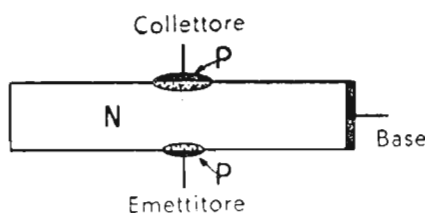
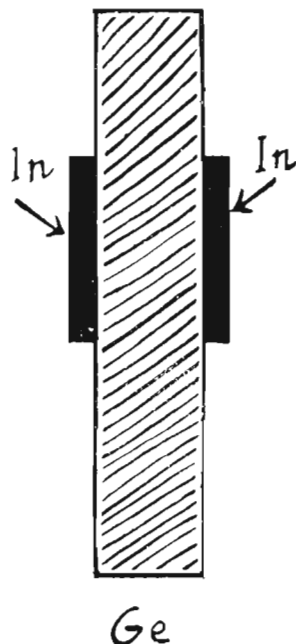
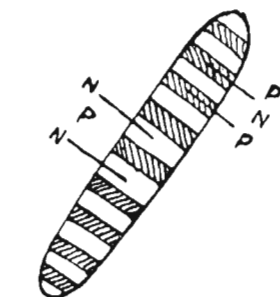
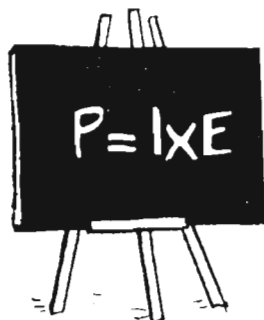



Fig. 36 - Vista in sezione di un transistore *P-N-P* formato per lega (o fusione).

fabbricazione, che chiamano, a « giunzioni sezionate », non è però affatto economico, poichè si ottengono delle zone troppo spesse. Inoltre, a forza di aggiungere ogni volta delle impurità, ora di una specie, ora di un'altra, si viene ad accrescerne continuamente il tenore nelle zone così successivamente formate, ciò che non va senza inconvenienti. Ciononostante, il metodo delle giunzioni sezionate è ancora impiegato attualmente in certi casi, soprattutto per il silicio.

Ign. - Ancora una volta, devo constatare che sono nato troppo tardi... torniamo dunque alle nostre piccole pastiglie e spiegatemi come vi si forma l'emettitore ed il collettore.

TRANSISTORI A LEGA

Cur. - Diversi procedimenti vengono impiegati a questo scopo, secondo il tipo di transistore che si vuole ottenere. Si tratta in sostanza di « drogare » o « inquinare » il materiale della base con delle impurità dell'altro tipo. Il procedimento più semplice e più frequentemente usato, consiste nel deporre sulle due facce d'una base di tipo *N*, delle pastiglie di indio e di saldarle rapidamente intorno ai 600 gradi. L'indio fonde a questa temperatura e i suoi atomi si introducono nel germanio il quale, pur non fondendo che a 940° C, diviene nondimeno, grazie all'accresciuta agitazione termica, più penetrabile per gli atomi d'impurità.

Si ottiene così un transistore *P-N-P*. E' da rilevare che la pastiglia formante il collettore, è più grande di quella dell'emettitore,

poichè, ne abbiamo già parlato, è nel collettore che si dissipa la maggior potenza. Quando l'operazione è condotta dosando opportunamente la temperatura ed il tempo di riscaldamento, si riesce a far penetrare le impurità in modo da ridurre lo spessore residuo della base ad un ventesimo di millimetro. I transistori così ottenuti per lega (o per fusione) sono adatti alla maggioranza delle esigenze d'impiego, ad eccezione delle frequenze elevate.

Ign. - Una volta di più, mi accennate a queste due difficoltà che rappresentano nel regno dei transistori, i valori elevati della potenza e della frequenza. Mi piacerebbe molto avere qualche schiarimento su questo argomento.

UN PROCESSO DI EVAPORAZIONE E DIFFUSIONE

Cur. - Incominciamo dunque dalla questione « potenza ». Dire « watt » significa dire « calorie ». Per fornire delle potenze sufficienti con le tensioni così deboli che vengono impiegate coi semiconduttori, occorre avere delle correnti di intensità piuttosto elevata.

Ign. - Evidentemente, poichè *Potenza* = *Tensione* × *Intensità.*

Cur. - Bravo! Ma queste correnti attraversando le giunzioni molto resistenti, vi generano del calore. E sapete anche come i semiconduttori mal sopportano una elevazione di temperatura.

Ign. - Quale rimedio escogitate dunque?

Cur. - Innanzi tutto aumentare la sezione del semiconduttore, onde avere dei transistori con superficie relativamente grande per ridurre la loro resistenza. Inoltre facilitare la dissipazione del calore montando il collettore su una grande piastra metallica che serve da radiatore di calore. Il rame che è un eccellente conduttore termico, è indicatissimo per questo uso.

Ign. - In modo che l'impiego razionale dei transistori necessita l'applicazione delle regole della termodinamica. Se ben comprendo, occorrerà che mi metta subito a studiare anche questa scienza, povero me!

Cur. - Rassicuratevi Ignoto; si possono applicare al calcolo della propagazione del calore, le regole che governano le correnti nei circuiti elettrici, ottenendo dei risultati assolutamente probanti...

Ma per ritornare ai transistori di potenza, vi segnalo che essi sono sovente realizzati col procedimento di *diffusione.* Si portano le pastiglie di semiconduttori a una temperatura prossima al loro punto di fusione ponendole in una atmosfera gassosa contenente dei vapori di impurità destinate a formare l'emettitore ed il collettore. Gli atomi d'impurità penetrano progressivamente nel semiconduttore. La operazione dura parecchie ore. Dosando opportunamente il tenore in impurità dell'atmosfera gassosa e regolando la durata dello diffusione, si perviene a determinare con precisione la profondità di penetrazione degli atomi estranei, e quindi lo spessore della base. Inoltre questo procedimento si presta molto bene all'ottenimento di grandi superfici di emettitore e di collettore per i transistori di potenza.

Ign. - Tanto meglio. Ma allora cos'è che ostacola il funzionamento dei transistori alle frequenze elevate?

I DUE OSTACOLI

Cur. - Due fattori: il tempo di transito e la capacità.

Ign. - Di quale transito si tratta?

Cur. - Del passaggio dei portatori di cariche attraverso la base, dell'emettitore verso il collettore. Questo tempo non è affatto trascurabile, poichè, ve l'avevo già detto, elettroni e lacune sono animati da una velocità limitata.

Prendiamo il caso degli elettroni percorrenti 40 metri al secondo. Supponiamo che si riesca a ridurre lo spessore della base a 1/10 di millimetro. Per attraversarlo, un elettrone avrà bisogno di 2,5 microsecondi.

Ign. - Non è poi gran cosa.

Cur. - Ma nei riguardi di un segnale di 1 megahertz (non dimenticate che 1 MHz è uguale a 1.000.000 di Hz) è decisamente troppo, poichè ogni periodo non dura che un solo microsecondo e che, men-

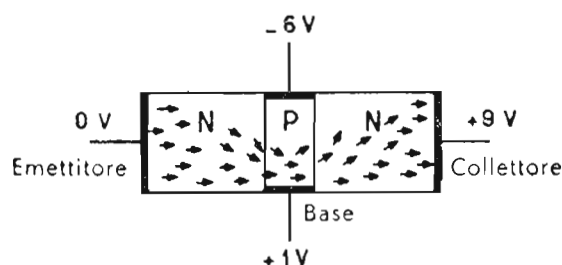
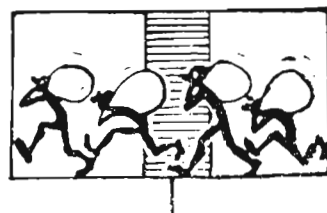



Fig. 37 - Principio del transistore-tetrodo. L'armatura portata a —6 volt, e posta di fronte alla connessione di base, respinge gli elettroni riducendo la sezione effettiva della base.

tre il nostro corteo di elettroni si muove tranquillamente attraverso la base, si sarebbe dovuto cambiare il movimento più di due volte. Ecco quindi un transistore incapace di amplificare le correnti con frequenza superiore a qualche centinaio di kilohertz.

Ign. - Quale tragica situazione! Non vedo che un'unica possibilità: ridurre lo spessore della base. E' possibile?

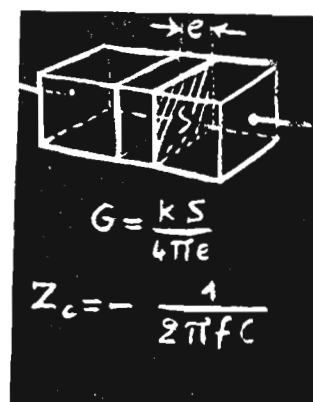
Cur. - Certamente, e ve ne indicherò i mezzi. Ma così facendo, accentueremo l'altro fattore pericoloso: la capacità fra l'emettitore ed il collettore. Poichè, assottigliando la base, voi lo ravvicinate.

Ign. - E perchè questa capacità ci disturba?

Cur. - Non vi ricordate dunque di tutte le malefatte che le capacità parassite commettono nei circuiti elettronici a tubi?

Anche qui esse arrecano i medesimi inconvenienti. La capacitanza (o reattanza capacitiva) che esse oppongono al passaggio delle correnti è tanto minore, quanto più elevata è la frequenza delle correnti. In modo che le correnti ad alta frequenza sono deviate dalle capacità parassite, in luogo di seguire i percorsi loro assegnati.

Ign. - Infatti, queste capacità sono come le maglie di una rete. Questa è capace di contenere delle grosse noci. Ma se vi si mettono dei piselli, questi vi passeranno attraverso.

Che fare allora, per rimediare al terribile dilemma? Da un lato si riduce lo spessore della base per diminuire il tempo di transito, mentre così facendo si accresce la capacità emettitore-collettore. E d'altra parte occorre che questa capacità sia più piccola possibile.

UN TETRODO CHE NON LO E'

Cur. - Vi lascio la cura di trovare voi stesso la soluzione. Vediamo un po', Ignoto, da cosa dipende la capacità, oltre che dalla distanza fra armature di un condensatore?

Ign. - Ci sono! Occorre ridurre la superficie di queste armature. Quindi, perchè i nostri transistori funzionino, occorre che le superfici dell'emettitore e del collettore siano molto piccole.

Cur. - E' proprio così. Vi prego tra l'altro di notare che vi è un mezzo indiretto per ridurre la capacità efficace, senza per questo diminuire eccessivamente la superficie delle giunzioni (ciò che limite-

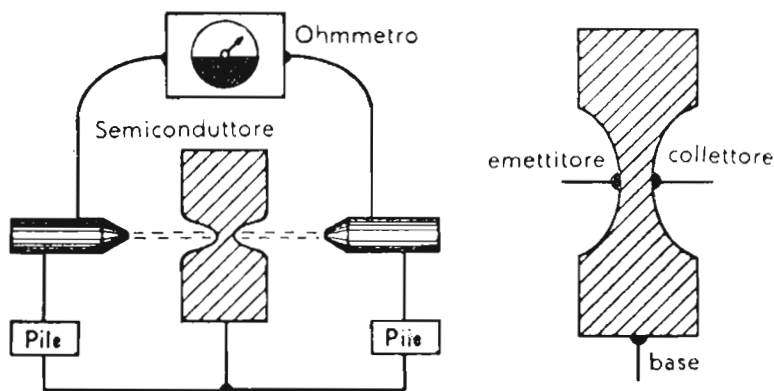



Fig. 38 - Procedimento di fabbricazione del transistore a barriera di superficie (surface barrier) e vista in sezione di un transistore di questo tipo.

rebbe di conseguenza la potenza dissipata). Ciò è stato realizzato nel « transistore-tetrodo ».

Mi affretto però a dirvi che il suo funzionamento non presenta alcuna analogia con quello del tetrodo a vuoto... Qui, il quarto elettrodo è posto sulla base, dal lato opposto alla connessione normale della base ed il suo potenziale è di segno contrario a quello della connessione di base, con riferimento al potenziale dell'emettitore. In queste condizioni, solo la porzione di base prossima alla sua connessione normale è ad un potenziale capace di favorire la circolazione dei portatori di cariche.

In tal modo la sezione effettiva del transistore si trova considerevolmente ridotta.

ASSOTTIGLIAMENTO DELLA BASE

Ign. - Non è poi del tutto cattivo, questo modo di strangolare il flusso degli elettroni o delle lacune! Ma in qual modo si perviene, nei transistori « classici », a ridurre lo spessore della base?

Cur. - Lo si fa, scavando da ciascun lato della base, una specie di cratere. I fondi dei due crateri arrivano allora ad una distanza dell'ordine di 0,002 millimetri. Si deposita allora nei due crateri un poco d'indio ed il giuoco è fatto.

Ign. - A sentirvi, ciò è molto semplice. Ma dubito molto sulla precisione degli utensili che si devono usare.

Cur. - Questi utensili, Ignoto, sono dei getti sottilissimi di liquido, che conducono della corrente continua attraverso il germanio. Ed

è il fenomeno dell'elettrolisi che, atomo per atomo, asporta la materia del semiconduttore. Al termine dell'operazione, il senso della corrente è invertito e l'elettrolito deposita i suoi atomi d'indio nei crateri scavati.

Ign. - Magnifico! Ma come si coglie il momento preciso in cui la base è sufficientemente sottile?

Cur. - Misurando la resistenza elettrica fra i due getti di liquido. I transistori così fabbricati possono venire utilizzati a delle frequenze sino ai 100 MHz. Si chiamano transistori a « *barriera di superficie* » od a « *strato di sbarramento* » (surface barrier).

Ign. - In ogni caso non fanno alcun sbarramento alle frequenze elevate!

Cur. - Un altro mezzo per ridurre lo spessore della base, è il metodo della *doppia diffusione*.

Per fare un transistore del tipo *P-N-P*, si prende una piastrina di semiconduttore del tipo *P*...

Ign. - Voi vi sbagliate, Curioso.

Cur. - Niente affatto. Vediamo un po' come si svolge questo procedimento. Anzitutto si sottopone all'azione dei vapori una sola faccia della piastrina. Ed i vapori contengono delle impurità dei due tipi, ma con dei donatori aventi una velocità di penetrazione leggermente superiore a quella degli accoglitori, questi ultimi essendo, per contro, più numerosi. Ne risulterà la formazione di un sottile strato N davanti ad uno strato *P*. Noi otterremo quindi un transistore *P-N-P*, la cui base non ha che un millesimo di millimetro di spessore, ciò che permette di utilizzarlo a delle frequenze sino ai 40 MHz.

Ign. - Veramente ingegnoso.

Cur. - E non lo è di meno anche il transistore *drift*, del tipo

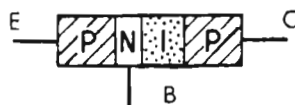
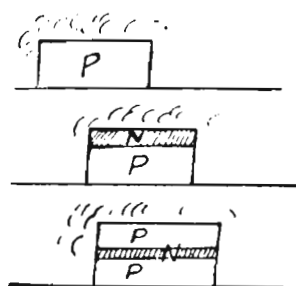
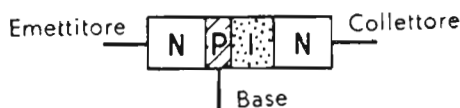



Fig. 39 - Due tipi possibili di transistori comportanti una zona intrinseca fra base e collettore: *P-N-I-P* e *N-P-I-N*.

N-P-N, il quale nello strato della base più prossimo all'emettitore, contiene un più alto tasso di impurità (accoglitori, eventualmente), in guisa di aumentarne la conduzione. In tal modo, gli elettroni che penetrano nella base sono notevolmente accelerati, ciò che permette di portare a 1000 MHz il limite delle frequenze.

Ign. - Di bene in meglio! Ma in questo ordine di idee, non si potrebbe, per ridurre la capacità emettitore-collettore, allontanare l'uno dall'altro questi due elettrodi, senza peraltro, accrescere lo spessore della base?

ALLONTANAMENTO DELLA BASE

Cur. - E qual mezzo preconizzate voi a tal fine?

Ign. - Immaginerei, interposto fra base e collettore, uno strato di

germanio neutro, nè *P* nè *N*, ma al solo scopo di assicurare la conduzione e la distanza ad un tempo.

Cur. - Ma non è poi tanto male, caro amico. E ciò esiste già sotto il nome di transistore *P-N-I-P*, ove le lettera *I* sta ad indicare lo strato di germanio intrinseco.

Ign. - Giurabbacco! Ancora una volta, mi hanno preceduto!

OVE SI TRATTA DI MONTAGNE

Cur. - Sono desolato, Ignoto... E per finire, voglio ancora indicarvi un tipo di transistore per alte frequenze, ottenuto per doppia diffusione.

Si prende un semiconduttore del tipo *P*, che servirà da collettore e vi si diffonde un sottile strato di impurità *N*, che costituirà la base. Poi, sempre dallo stesso lato, si fanno penetrare per diffusione delle impurità del tipo *P* le quali, riducendo così lo spessore della base a qualche 0,002 mm formeranno l'emettitore. L'astuzia consiste nell'effettuare quest'ultima diffusione attraverso una maschera, in modo da agire solo lungo strisce strettissime in superficie. Questa presenta quindi alternativamente delle strisce di tipo *P* (emettitore) e di tipo *N* (base). Si depositano allora su questa superficie delle gocce di cera che coprono ad un tempo una parte *P* ed una parte *N*. Il diametro della goccia non supera un quarto di millimetro. Si immerge allora la piastrina così trattata in una soluzione che attacca le zone della superficie non protette dalla cera.

L'incisione chimica così effettuata lascia pertanto intatte le piccole zone protette, riducendo lo spessore delle altre.

La superficie della piastrina si trova così coperta di minuscoli monticelli, ciascuno dei quali, una volta sbarazzati dalla cera, offre la possibilità di stabilire le connessioni di base e di emettitore. Queste sono realizzate in filo d'oro di 0,025 mm di diametro.

Ign. - Com'è possibile maneggiare dei fili tanto fini?

Cur. - Sotto un microscopico binoculare. Ma dapprima, beninteso, la piastrina incisa è tagliata in altrettanti pezzetti quanti sono i monticelli, ciascuno dei quali costituisce un transistore. Tale tipo di transistore viene chiamato « mesa », dal nome che nel Sud America viene dato a certi pianori montagnosi caratterizzati da pareti ripidissime. E questi « mesa » superano ottimamente frequenze di oltre 100 MHz, cioè sotto i 3 metri di lunghezza d'onda.

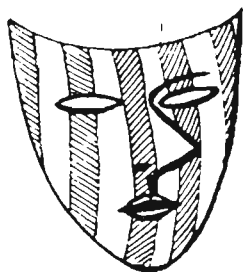
Ign. - Ma quali cure, quali minuzie esige la fabbricazione di queste montagne microscopiche!

LE FASI FINALI DELLA FABBRICAZIONE

Cur. - E non credete, Ignoto, che il lavoro sia terminato quando si è formato l'emettitore, mediante uno dei processi citati, per lega, per elettrolisi o per diffusione. Notate tra l'altro, che questi tre processi ricorrono rispettivamente ad agenti solidi, liquidi o gassosi.

Ign. - Ma cosa resta ancora da fare perchè il transistore sia alfine pronto ad affrontare le vicissitudini dell'esistenza?

Cur. - Trattare la sua superficie con un lavaggio nell'acido ed assicurargli la sua cospicua longevità montandolo rigidamente in mo-

do da resistere a colpi e vibrazioni. Poi rinchiudendolo in un astuccio metallico stagno e opaco, onde proteggerlo dall'umidità, nemica mortale dei semiconduttori e dalla luce.

Ign. - Ma perchè poi?

Cur. - Perchè, ve l'avevo già detto, i raggi luminosi possono modificare la conducibilità dei semiconduttori o provocano una emissione elettronica. Questi fenomeni sono messi a profitto nei fotodiodi

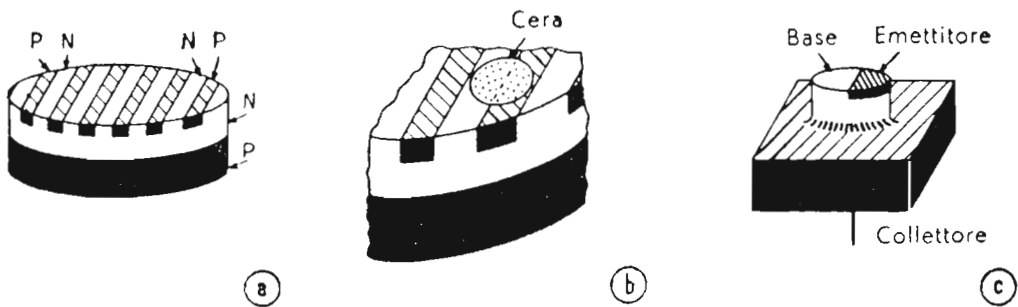



Fig. 40 - Fasi successive nella fabbricazione di un transistore « mesa ».

e nei foto-transistori. Ma un transistore normale deve essere messo al riparo dalla luce. Esso è pertanto rinchiuso sia in una capsula di materia plastica, sia in un astuccio metallico sotto vuoto o in gas inerte quale l'azoto. L'applicazione delle connessioni pone sovente dei problemi molto ardui, poichè occorre assicurare dei contatti pura-

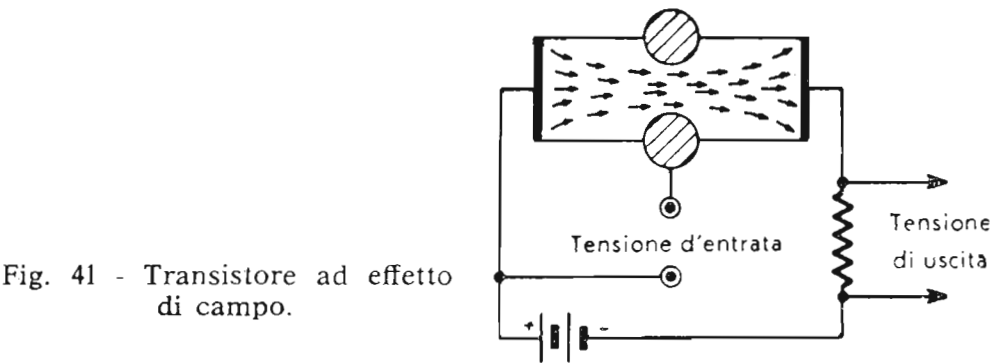



Fig. 41 - Transistore ad effetto di campo.

mente ohmici fra le tre zone del transistore ed i corrispondenti fili, evitando ad ogni costo la formazione di giunzioni parassite.

Ign. - Vedo, tutto sommato, che per fabbricare un transistore occorre conoscere bene la fisica, la chimica e la meccanica. E' un po' troppo. Preferisco acquistarli. A meno che...

LAVORO DI CAMPI

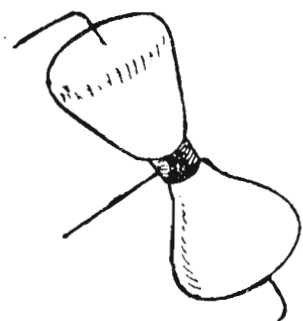
Cur. - Quale strana idea mi volete ora esporre?

Ign. - Credo che vi sarebbe un mezzo di fabbricare un transistore senza base, nè emettitore, nè collettore. Perchè non prendere un semplice bastoncino di germanio o di silicio e circondarlo nel mezzo da un anello a cui applicare la tensione da amplificare? Il campo elet-

trico così creato strozzerebbe più o meno il flusso dei portatori di cariche circolanti da un'estremità all'altra del bastoncino. E la corrente vi sarà modulata esattamente come avviene in un triodo a vuoto sotto l'azione del potenziale di griglia.

Cur. - Mio povero Ignoto!

Ign. - Cos'è che non va nel mio ragionamento?

Cur. - Ma tutto va così bene, che il dispositivo che state inventando esiste già da tempo. Lo si chiama transistore ad *effetto di campo* o « *fieldistor* ». Gli si avvicina ugualmente il « *tecnetron* », inventato dall'ingegnere francese S. Teszner, che unisce tutti i vantaggi dei transistori e dei tubi a vuoto. Ma mi domando in quale misura questi dispositivi speciali possono ancora essere considerati come facenti parte della grande famiglia dei transistori...

SESTA CONVERSAZIONE

Per utilizzare i triodi a cristallo, occorre conoscerne le caratteristiche essenziali. Queste possono essere espresse, come per i tubi, sia mediante i valori numerici dei parametri fondamentali, che mediante curve indicanti come certe grandezze variano in funzione di altre.
Ecco perchè i nostri due amici si dedicheranno all'esame delle diverse caratteristiche numeriche e grafiche dei transistori.

SOMMARIO: *Circuiti per il rilievo delle caratteristiche — Curve* $I_b = f(E_b)$, *e* $I_c = f(E_b)$ — *Pendenza — Amplificazione di corrente — Resistenza d'entrata — Relazione fra pendenza, resistenza interna e amplificazione di corrente — Saturazione — Famiglie di curve — Analogia col pentodo — Potenza limite — Resistenza d'uscita — Determinazione dei parametri deducendoli da sistemi di curve.*

IL REGNO DELLE CURVE

UNA INIZIATIVA DI IGNOTO

Curioso. - Giurabbacco! Cosa vedo! Cos'è questa straordinaria raccolta di strumenti di misura, di pile e di potenziometri sul vostro tavolo?

Ignoto. - Evidentemente, voi non avete scorto il vero protagonista. Ed a ragione. Poichè in mezzo ai voltmetri e milliamperometri, il transistore è così piccolo! E ciò nonostante è proprio lui il personaggio principale della festa.

Cur. - Ma qual'è lo scopo di tutto questo spiegamento d'apparecchi?

Ign. - Vi ricordate come, tempo fa, noi rilevammo insieme le curve caratteristiche dei tubi elettronici: le variazioni della corrente anodica in funzione sia della tensione di griglia, che della tensione di placca? Ebbene vorrei fare dei rilievi analoghi sul mio transistore.

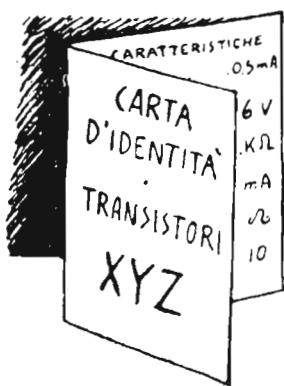
Cur. - Lodevole tentativo. E ci riuscite?

Ign. - Sì e no... Non è una risposta sibillina. Ma ciò che mi turba, è che coi tubi non avemmo a prendere in considerazione che tre grandezze, mentre col transistore se ne devono considerare quattro.

Cur. - Esattissimo. Infatti, salvo casi eccezionali, i tubi funzionano senza corrente di griglia. Per contro, la corrente di base, giuoca un ruolo fondamentale nel funzionamento del transistore.

UN MONTAGGIO RAZIONALE

Ign. - Ecco dunque lo schema di montaggio che ho ideato per rilevare queste quattro grandezze.

Cur. - Riconosco qui il potenziometro P_1 che permette di variare

TUBI ELETTRONICI	TRANSISTORI
Intensità di corrente anodica Ia	Intensità di corrente di collettore Ec
Tensione anodo-catodo Ea	Tensione collettore-emettitore Eb
Tensione griglia-catodo Eg	Tensione base-emettitore Eb
	Intensità di corrente di base Ib

a volontà la tensione fra base ed emettitore, tensione misurata dal voltmetro E_b. Avete d'altra parte, un potenziometro P_2 che serve a variare la tensione collettore-emettitore, misurata del voltmetro E_c. E voi rilevate la corrente di base mediante il microamperometro I_b, mentre l'intensità della corrente di collettore è misurata con l'aiuto

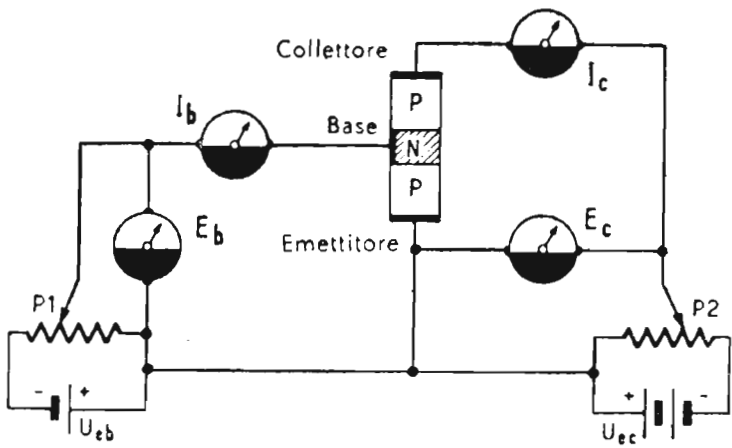
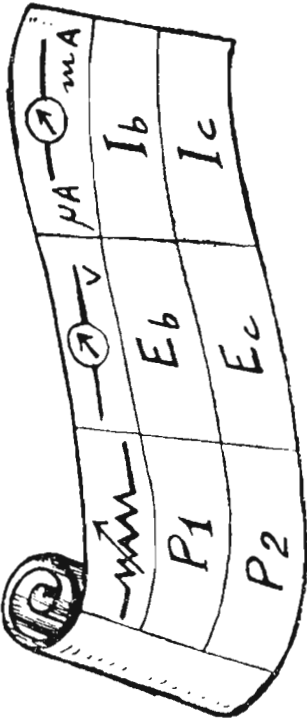



Fig. 42 - Montaggio per il rilevamento delle caratteristiche del transistore.

del milliamperometro I_c. Complimenti, Ignoto: col vostro montaggio, si può fare un buon lavoro! Cos'è dunque che vi disturba?

Ign. - Ho l'impressione di essere vittima dello scherzo atroce che ho giuocato alla nostra brava cuoca Maddalena.

Cur. - Ma cosa c'entra questa martire della vostra crudeltà, nel campo dei semiconduttori?

Ign. - Una sera, avevo riunito fra loro tutte le pentole mediante un filo sottile, in modo che, quando Maddalena volle prenderne una, tutta la batteria di cucina le precipitò in testa.

Cur. - Ciò fa onore alla vostra immaginazione... se non al vostro buon gusto. Ma non riesco ancora a vedere come...

Ign. - Ma è evidente. Ho l'impressione che le lancette dei miei strumenti siano legate da fili invisibili, come le pentole di Maddalena. Appena una di esse si muove, altre due si mettono anch'esse in

moto. Per esempio, quando giro il potenziometro P_1, variando così la tensione E_b della base, la corrente I_b di base varia anch'essa, contemporaneamente alla corrente I_c del collettore.

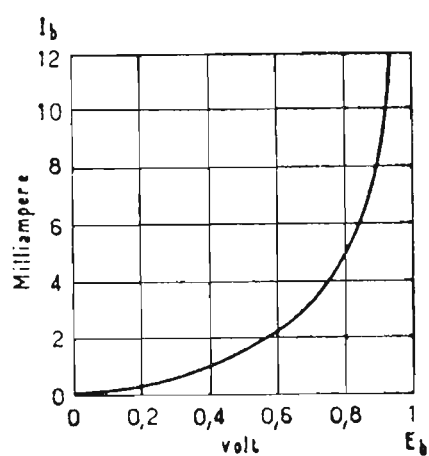



Fig. 43 - Corrente di base I_b in funzione della tensione base-emettitore E_b. In questa figura, come in tutte quelle che rappresentano le curve caratteristiche, la polarità delle tensioni di base e di collettore non è precisata. Essa è positiva per i transistori *N-P-N* e negativa per i *P-N-P*.

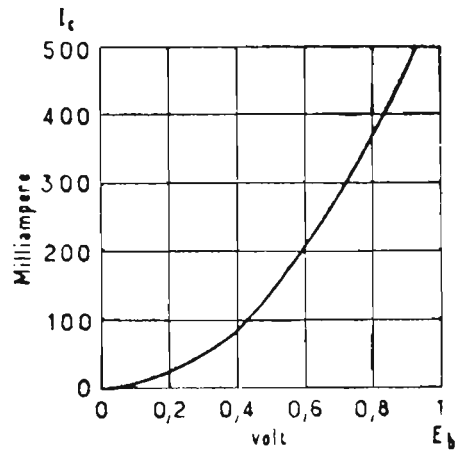



Fig. 44 - Variazione della corrente I_e in funzione della tensione base-emettitore E_b.

Queste due curve, relative a un transistore di media potenza, sono state rilevate mantenendo costante la tensione sul collettore.

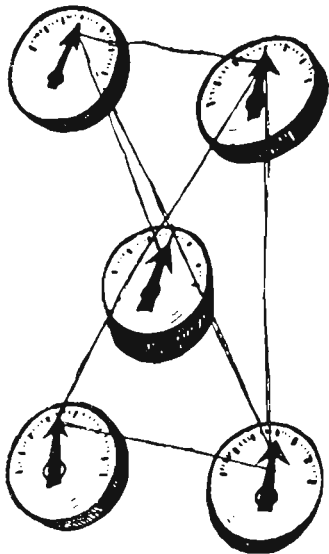
DUE PRIME CURVE

Cur. - E non è questo assolutamente normale? E' il principio stesso del funzionamento del transistore, che voi mettete così in evidenza.

Applicando fra base ed emettitore una tensione crescente, voi aumentate l'intensità della corrente diretta dell'emettitore verso la base e per questo, intensificate la corrente diretta dall'emettitore, attraverso la base, verso il collettore.

Ign. - Esatto, E' perfettamente analogo all'influenza della griglia sulla corrente anodica nei tubi a vuoto. Comunque, ecco qui le due curve che ho rilevato regolando P_1 e segnando per ogni valore della tensione E_b, da un lato l'intensità I_b e dall'altro lato l'intensità I_c.

Cur. - Molto bene, Ignoto. Vedo che si tratta di un transistore di media potenza, poichè la corrente raggiunge il rispettabile valore di mezzo ampere... La vostra prima curva, che riguarda unicamente le relazione fra emettitore e base, e dove si vede la corrente di base variare in funzione del suo potenziale nei rispetti dell'emettitore, è semplicemente la caratteristica del diodo formato dall'emettitore e la base.

Ign. - E' vero! Insomma, la corrente inizia lentamente, poi cresce via via, più rapidamente. Vedo che questa curva non offre un grande interesse. Per contro, quella ove si vede la corrente di collettore variare sotto l'azione della tensione di base, mi sembra della massima importanza.

IGNOTO SI IMPEGNA SU UNA PENDENZA FATALE

Cur. - Andiamoci piano, amico mio. Questa seconda curva è effettivamente molto istruttiva. Essa mostra in modo particolare che la « *pendenza* » del transistore, lungi dall'essere costante, varia secondo i valori della tensione di base,

Ign. - Come mai? Nei transistori si può parlare ugualmente di pendenza? Per le valvole, è il rapporto fra una piccola variazione di corrente anodica ed una piccola variazione di potenziale di griglia che l'ha causata.

Cur. - Ebbene, qui, per analogia, definiremo la pendenza come il rapporto fra una debole variazione ΔI_c *e* la piccola variazione ΔE_b di tensione di base che l'ha determinata. Se si indica la pendenza con *S*, si avrà:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta E_b}$$

e ciò si esprime, come per i tubi in milliampere per volt.

Ign. - Constato effettivamente, che la pendenza del nostro transistore aumenta quando la tensione di base cresce. Fra 0,2 e 0,4 V la corrente non cresce che di 50 mA, mentre passando la tensione di base da 0,6 a 0,8 V, la fa crescere di circa 180 mA. La pendenza è quindi nel primo caso di 50/(0,4 — 0,2) = 250 mA/V, e nel secondo, di 180/(0,8 — 0,6) = 900 mA/V. E' formidabile! Quando mai un tubo ha permesso di raggiungere tali valori di pendenza?

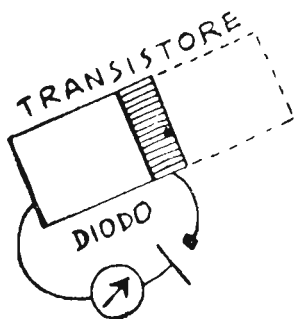
Cur. - Non ne deducete però troppo presto, che l'amplificazione del transistore è anch'essa formidabile. Il ruolo della pendenza è qui molto attenuato, poichè ciò che conta in definitiva, è l'influenza della corrente di base sulla corrente di collettore.

PERICOLO! POTENZA LIMITATA

Ign. - L'ho messa in evidenza rilevando i valori della corrente di collettore I_c, in funzione della corrente di base I_b, per due valori della tensione E_c sul collettore: 2 V e 10 V.

Cur. - E perchè una parte della curva per quest'ultima tensione E_c = 10 V, è tracciata punteggiata?

Ign. - Perchè l'ho tracciata a « sentimento ». Infatti non ho osato andare oltre una corrente di collettore pari a 35 mA, perchè il mio transistore ha un limite di potenza di 350 mW (l'istruzione del costruttore è a questo proposito molto esplicita). I miei 35 mA, moltiplicati per i 10 V, danno bene questa potenza limite. E non vorrei superarla, col rischio di provocare quella valanga di lacune e di elettroni che caratterizza un transistore « imballato »... e di vedere così depauperato il frutto delle mie economie.

Cur. - Voi vi siete comportato saggiamente, e me ne felicito. Notate, che più sovente le curve che riportano la variazione di I_c sotto l'azione di I_b, si avvicinano alla retta. Abbiamo d'altronde già avuto l'occasione di esaminarne una nella figura 24.

Ign. - Infatti. E mi ricordo che queste curve permettono di determinare il coefficiente d'amplificazione in corrente β. Esso indica quante volte la corrente di collettore varia più rapidamente di quella di base.

Cur. - Potreste dedurlo, per esempio, dallo curva $E_c = 2$ V?

Ign. - E' molto facile. Quando facciamo passare la corrente di base, per esempio, da 0,5 a 1,0 mA (punti *A* e *B*), la corrente di collettore passa da 70 a 97,5 mA. Quindi una variazione di 0,5 mA della corrente di base provoca un aumento di 27,5 mA della corrente di

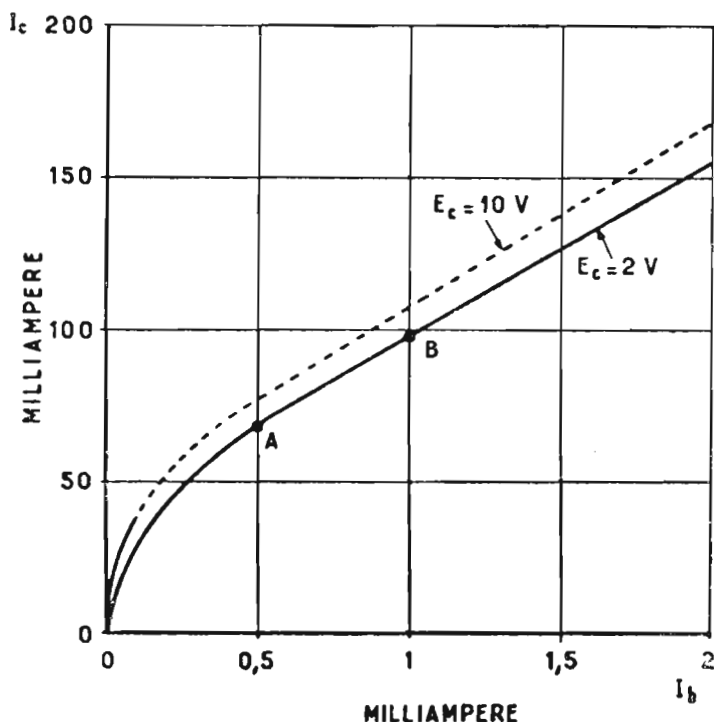



Fig. 45 - Variazione della corrente di collettore I_e in funzione della corrente di base I_b per due valori della tensione di collettore E_c.

collettore. L'amplificazione di corrente è quindi $\beta = 27{,}5/0{,}5 = 55$ volte.

Cur. - Bravo! Ed in modo più generale, si può dire che:

$$\beta = \frac{\Delta\ I_c}{\Delta\ I_b}$$

ove $\Delta\ I_c$ e $\Delta\ I_b$ sono rispettivamente delle piccole variazioni di corrente di collettore e di corrente di base.

UNA RESISTENZA CHE MANCAVA ALL'APPELLO

Ign. - Guarda, guarda! Ciò mi ricorda qualcosa come un'aria della mia lontana giovinezza, tutte queste piccole variazioni di correnti e di tensioni. Dopo la pendenza ed il coefficiente di amplificazione, manca ancora la resistenza interna e noi ritroveremo la stessa famiglia di parametri fondamentali, come per i tubi a vuoto.

Cur. - Andate piano, amico mio! Diffidate una volta di più, dalle analogie ingannevoli. Il coefficiente d'amplificazione dei tubi è un rapporto fra due tensioni; per i transistori è il quoziente fra due correnti. Parimenti, quando si parla della resistenza interna dei tubi, si intende quella di uscita. Ora, nel campo dei transistori, abbiamo già avuto l'occasione di parlare della loro resistenza d'entrata, o resistenza emettitore-base. E come ogni resistenza, questa è un rapporto fra una tensione e una corrente, secondo la legge del fisico Ohm.

Ign. - Ora, per parlare con lo stesso vostro rigore, è il rapporto fra una piccola variazione di tensione di base e la piccola variazione ch'essa determina nella corrente di base. E adottando come voi quei « delta » per indicare le piccole variazioni, scriverò che questa resistenza d'entrata è espressa da

$$r_e = \frac{\Delta E_b}{\Delta I_b}$$

rimanendo costante la tensione del collettore.

Cur. - Ignoto, avreste ingoiato una sogliola gigante per avere il cervello così pieno di fosforo? E giacchè ci siamo, potreste da una delle vostre curve ricavare il valore della resistenza d'entrata del vostro transistore?

Ign. - Nulla di più facile. Ritorno alla curva della figura 43 che mostra come I_b varia, in funzione di E_b, e constato che passando da 0,5 a 0,6 V, la corrente varia di circa 1 mA. Ricavo quindi r_e, dividendo 0,1 per 1, ciò che mi da 0,1 ohm.

Cur. - Non avete vergogna, Ignoto, di confondere, alla vostra età, milliampere con ampere?

Ign. - Mille scuse! Infatti devo dividere 0,1 V per 0,001 A, ciò che mi da $r_e = 100\ \Omega$.

UNA RELAZIONE UTILISSIMA

Cur. - Preferisco questo valore. E per punirvi di questo madornale errore, vi infliggerò un piccolo problema di calcolo: moltiplicate la pendenza per la resistenza interna, utilizzando le definizioni di queste grandezze.

Ign. - E' facile:

$$S \times r_e = \frac{\Delta I_c}{\Delta E_b} \times \frac{\Delta E_b}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \beta$$

Sospettavo bene che sarei andato a finire in qualcosa del genere. Così, quindi, l'*amplificazione di corrente è uguale al prodotto della pendenza per la resistenza d'entrata.*

Ciò mi ricorda la relazione esistente per i tubi: $K = S \times \rho$, ove però, ρ indica la resistenza d'uscita.

Cur. - Potreste verificare che questa uguaglianza si applica bene ai parametri che avete calcolato per il vostro transistore?

Ign. - Intorno a 0,5 V, la pendenza, secondo la curva della figura 44, sarà di 500 o 600 mA/V, ossia in media 0,55 A/V. Se la moltiplico per la resistenza interna, che allo stesso punto è di 100 Ω, ottengo 55, ciò che è esattamente l'amplificazione di corrente che avevamo trovato.

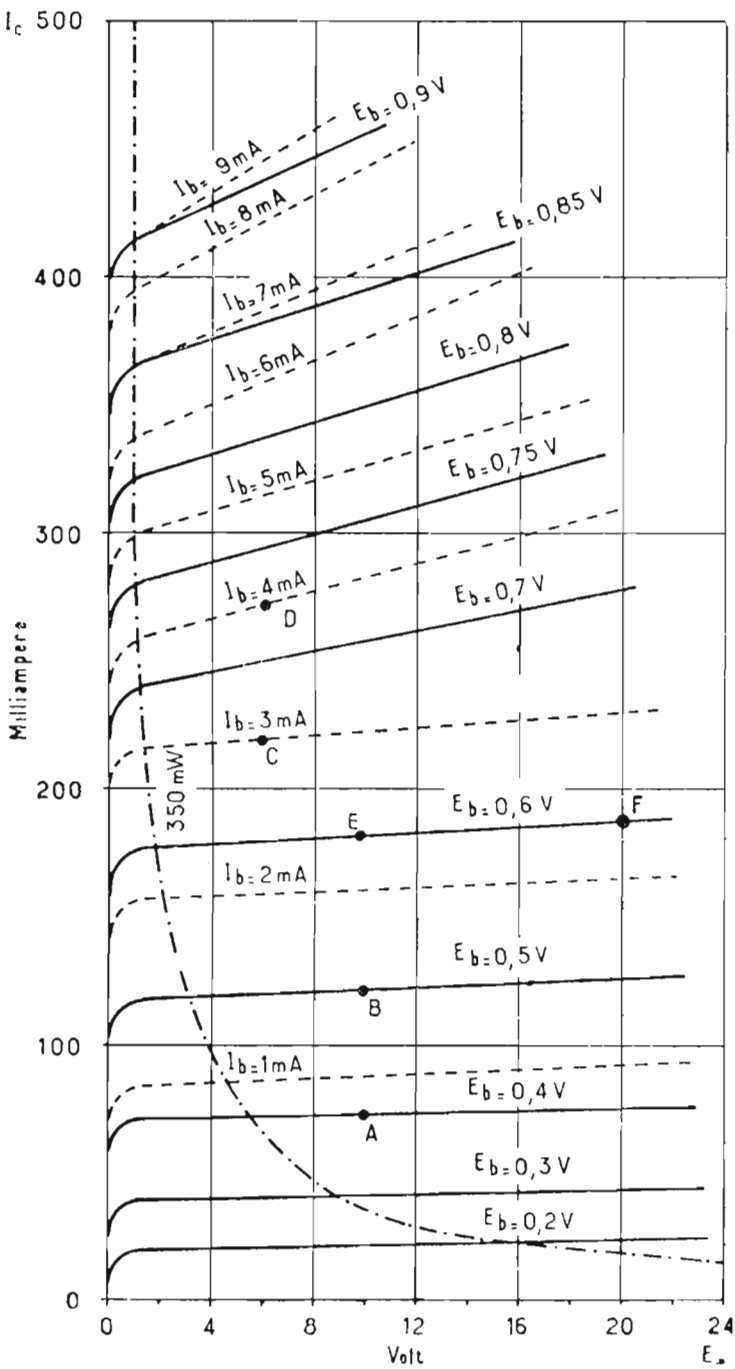
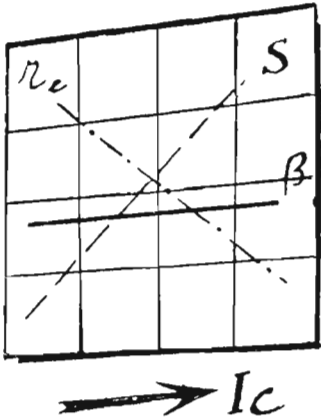



Fig. 46 - Variazioni della corrente di collettore I_c in funzione della tensione di collettore E_c per diversi valori della tensione E_b e della corrente I_b di base. Si tratta sempre del transistore di media potenza che ha permesso di rilevare le curve delle figure 43 e 45.

Cur. - Sono contento che vada così tutto bene. Vogliate comunque notare, Ignoto, che generalmente il coefficiente d'amplificazione non varia affatto quando la corrente di collettore aumenta. Mentre, lo abbiamo visto, la pendenza aumenta con I_c.

Ign. - Dal che, traggo la conclusione che, perchè la nostra relazione $S \times r_e = \beta$ resti valida, la resistenza d'entrata deve, dal canto suo, diminuire quando la corrente di collettore aumenta.

TUTTE LE CURVE IN GRAFICO

Cur. - La verità esce dalla bocca dei bimbi... Occorre ora dirvi, caro amico, che le diverse informazioni sparse nelle curve che voi avete rilevato, sarebbero più facilmente utilizzabili se vi deste la pena di tracciare a seguito delle vostre misure, un grafico indicante come la corrente di collettore varia quando si varia la tensione del collettore stesso.

Ign. - Si tratta, se ben comprendo, di curve analoghe a quelle della corrente anodica in funzione della tensione anodica.

Cur. - Esattamente questo.

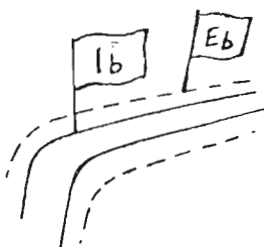
Ign. - Ma per quale valore di tensione sulla base devo tracciare tale curva?

Cur. - Traccerete una serie di curve per diversi valori di E_b. Incominciate, per esempio, dal valore di 0,2 V. Aumenterete poi progressivamente la tensione sul collettore, partendo da zero, prendendo nota delle corrispondenti correnti I_c.

Ign. - Ciò che accade è molto curioso. La corrente, partendo da zero, raggiunge rapidamente il valore di 20 mA per meno di 2 V, dopodichè non aumenta quasi niente, anche spingendo sino a 24 V la tensione al collettore. Come si spiega tutto ciò?

Cur. - Siete in presenza di un fenomeno di saturazione. Quando tutti i portatori di cariche suscitate dalla tensione applicata fra la base e l'emettitore partecipano alla formazione della corrente di collettore, avrete un bell'aumentare la tensione di collettore...

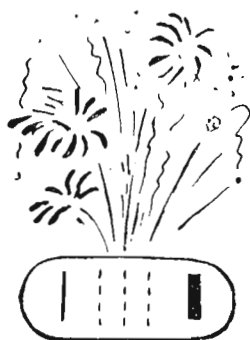
Ign. - ... la più bella donna del mondo, non può dare più di ciò che ha.

Cur. - Ora che avete tracciato la curva per $E_b = 0{,}2$ V, potrete rilevarne altre per $E_b = 0{,}3$ V e così di seguito. Inoltre, potrete fissare non più un tale o tal'altro valore della tensione di base, ma bensì (ciò che è lo stesso) tutta una serie di valori di corrente di base I_b. Potrete notare che otterremo così due famiglie di curve mostranti la variazione della corrente di collettore in funzione della tensione di collettore per diversi valori della tensione o della corrente di base. Questi ultimi valori, che sono fissi per ciascuna delle curve, vengono chiamati i parametri.

RASSOMIGLIANZE E DIFFERENZE

Ign. - Queste nobili famiglie rassomigliano molto a quelle, che, per i tubi a vuoto, mostrano come la corrente anodica varia in funzione della tensione anodica, avendo, come parametro la tensione di griglia. La rassomiglianza è particolarmente spiccata nel caso dei pentodi.

Cur. - Esatto. Però voi noterete due differenze essenziali. Da un lato le curve di un pentodo sembrano sorgere da un solo punto, divergendo poi da questo...

Ign. - ... come in un fuoco d'artificio.

Cur. - Se volete. Circa le curve dei transistori, esse salgono rapidamente per rimanere pressochè orizzontali dopo aver oltrepassato un gomito. Lo potrete meglio constatare esaminando le curve di un transistore di piccola potenza. D'altra parte le curve di un pentodo

sono molto ravvicinate per dei piccoli valori di tensione di griglia (voglio intendere quando la griglia è fortemente polarizzata).

Poi la distanza fra le curve vicine aumenta. Ma nel caso del transistore, le curve per diverse correnti di base (in punteggiate) sono sensibilmente equidistanti. E ciò è tutto a vantaggio del nostro triodo a cristallo.

Ign. - Ma perchè dunque?

Cur. - Non capite ch'esso è capace di amplificare più fedelmente del pentodo, soprattutto i segnali di notevole ampiezza? La stessa

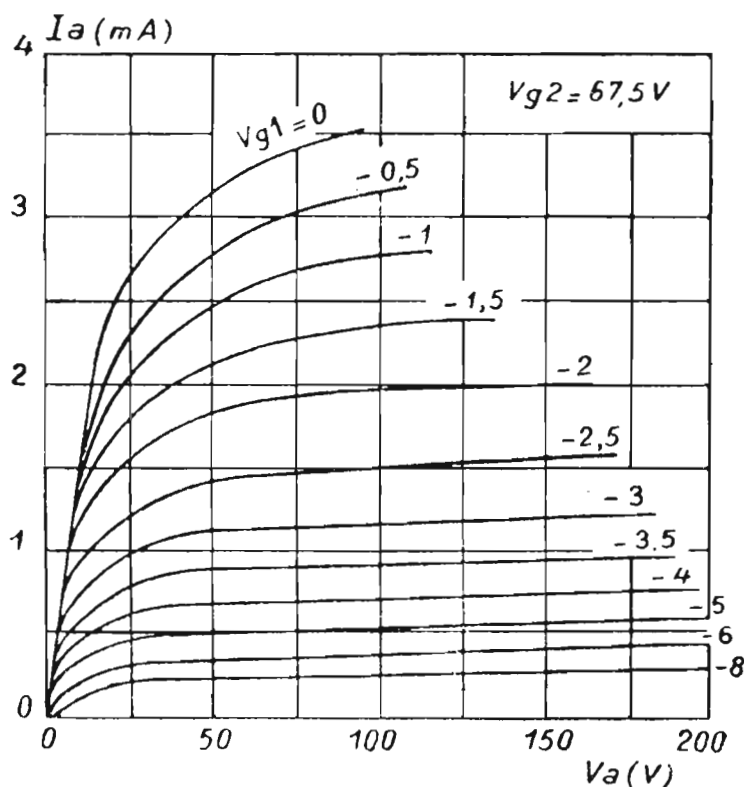



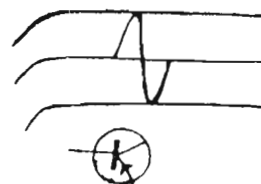
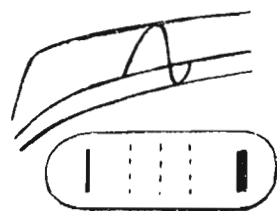
Fig. 47 - Variazione della corrente anodica di un pentodo, in funzione della sua tensione anodica per diversi valori della polarizzazione di griglia.

variazione di corrente di base nel senso positivo e nel senso negativo, vi determinerà delle variazioni di valori uguali di corrente di collettore. Mentre in un pentodo, le alternanze positive e negative della tensione di griglia determinano delle variazioni disuguali della corrente anodica.

Ign. - E ciò si manifesta con quella orribile deformazione che si chiama distorsione non lineare. Ecco quindi che i transistori hanno sui pentodi il vantaggio di una migliore linearità. Viva il transistore!

UTILIZZAZIONE DELLE CURVE

Cur. - Vorrei ritornare alle nostre famiglie di curve della figura 46, per mostrarvi a qual punto esse diano un'idea completa delle proprietà principali del transistore. Potete dedurne la pendenza in un punto qualsiasi della tensione di base.

Ign. - Infatti, se passiamo per esempio, da 0,4 a 0,5 V (dal punto *A* al punto *B*), la corrente passa da 75 a 125 mA, cioè un aumento di 50 mA. E la pendenza è 50/0,1 = 500 mA/V.

Cur. - Potrete con la stessa facilità dedurre dal nostro grafico l'amplificazione di corrente.

Ign. - Penso che occorrerà, a questo scopo, passare da una curva di I_b, ad un'altra. Prendiamo per esempio i punti C e D pei quali la corrente di base differisce di 1 mA, mentre quella del collettore passa da 220 a 275 mA, cioè un aumento di 55 mA. Ed ecco quindi la

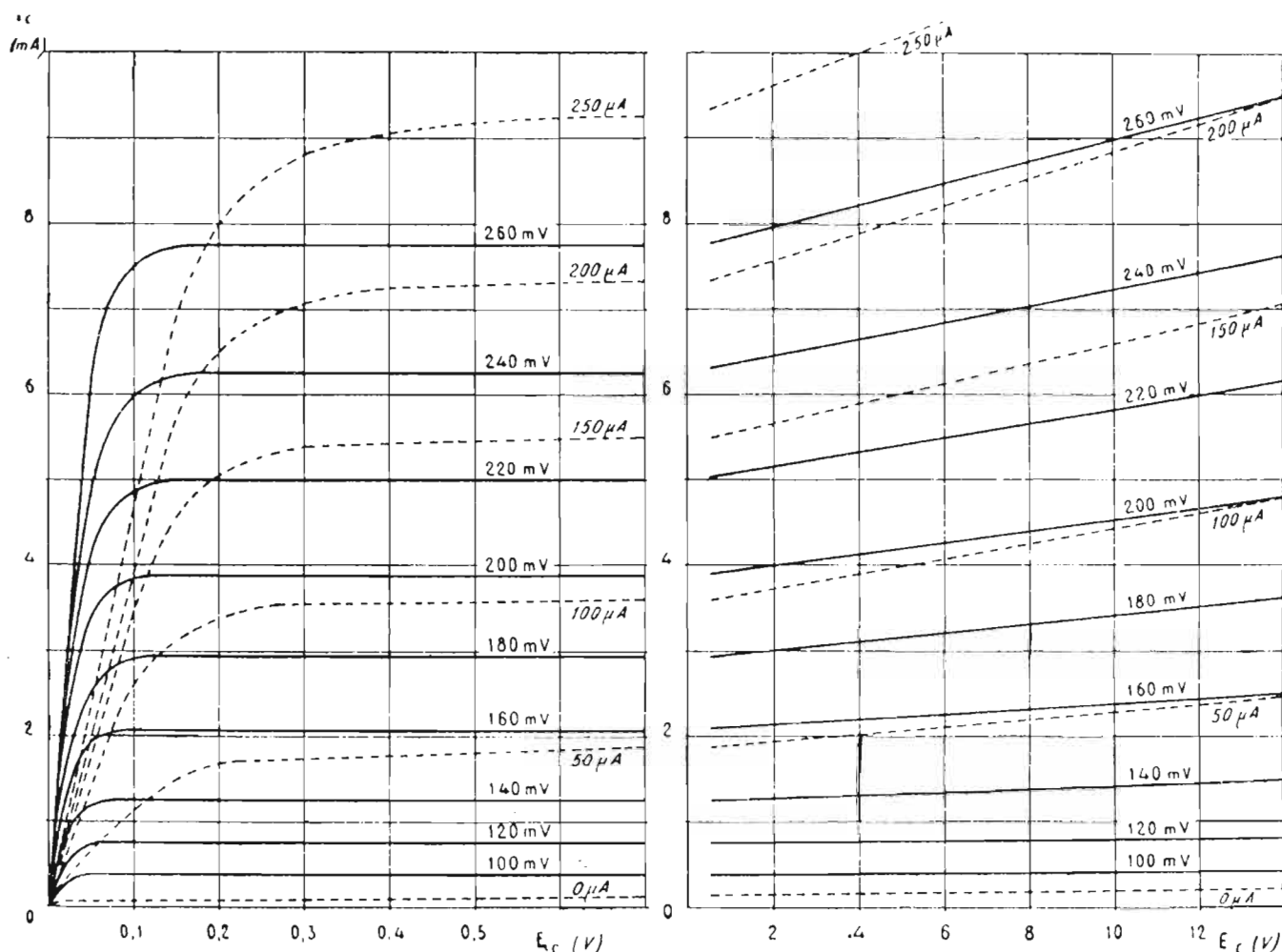



Fig. 48 - Curve I_c/E_c di un transistore di piccola potenza. A sinistra la scala delle tensioni di collettore E_c è dilatata in modo da mostrare con maggior chiarezza ciò che avviene nella regione compresa fra 0 e 0,7 V.

nostra amplificazione di corrente: $\beta = 55/1 = 55$. Nulla di più facile... Ma cos'è questa curva bizzarra che scende da sinistra per andare a destra e che avete segnato con 350 mW?

Cur. - Essa indica la potenza limite del transistore. Per ciascuno dei suoi punti, il prodotto della tensione di collettore per la sua corrente corrispondente, è uguale a 350.

Ign. - Infatti, per 10 V abbiamo 35 mA, come per 5 V abbiamo 70 mA. E' quindi un limite da non superare?

Ritorno dei « delta »

Cur. - Sì. questa curva è una iperbole. E noi avremo l'occasione di ritornarvi. Nel frattempo, vorrei familiarizzarvi con un'altra caratteristica altamente utile del transistore: la sua *resistenza d'uscita.* Non indovinate di cosa si tratta?

Ign. - Col poco fosforo che ancora mi rimane, tenterò di farlo. Suppongo che si tratti della resistenza che impone il suo comportamento alla corrente di collettore, quando la si fa variare variando la tensione dello stesso collettore. E' così?

Cur. - Molto bene, Ignoto. Aggiungete che durante queste variazioni, la base rimane ad un potenziale fisso. E continuate pensando al nostro santo Ohm.

Ign. - Ci sono. Questa resistenza d'uscita è il rapporto fra la tensione di collettore e la sua corrente.

Cur. - Non è proprio la definizione esatta. Vi mancano alcuni piccoli « delta »...

Ign. - E' impossibile sbagliare con questi suggerimenti... Ecco dunque una definizione da fare impallidire il mio vecchio professore di matematica. Si chiama resistenza d'uscita d'un transistore, il rapporto fra una piccola variazione della tensione di collettore e la piccola variazione della corrente di collettore che l'ha provocata supponendo che la tensione della base sia mantenuta costante. E ciò si scrive:

$$r_u = \frac{\Delta E_c}{\Delta I_c}$$

(ciò che corrisponde a $\dfrac{\Delta E_a}{\Delta I_a} = \rho$ nei tubi).

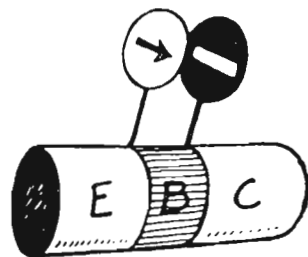
Cur. - La vostra aria trionfante è giustificata. La sogliola gigante continua ad esercitare sul vostro intelletto la sua benefica azione... Potreste allora, basandovi sempre sul grafico della figura 46, determinare la resistenza d'uscita del nostro transistore per, diciamo E_b = 0,6 V?

Ign. - Molto facile... Prendo due punti *E* ed *F*, corrispondenti alle tensioni di 10 e di 20 V sul collettore, cioè una differenza di 10 V, e vedo che la corrente di collettore passa da 180 a qualcosa come 182 mA, cioè un aumento di 2 mA o 0,002 A.

Ne consegue che la resistenza d'uscita è uguale a 10/0,002 = 5000 Ω.

Cur. - Perfetto. Se voi l'aveste calcolata per dei valori più elevati delle correnti, l'avreste trovata ancora più bassa. Ma, non dimenticatelo, noi siamo in presenza di un transistore di potenza media. Se voi prendete un tipo di piccola potenza, quale è quello delle curve di figura 48, avreste trovato delle resistenze d'uscita molto più elevate. Queste curve, infatti sono quasi orizzontali. Ed anche un forte aumento di E_c, non provoca che un insignificante aumento di I_c. Ciò significa che il loro quoziente si esprime in decine di migliaia di ohm

Ign. - Che bizzarra bestia è questo transistore la cui resistenza d'entrata è piccola e quella d'uscita elevata. Si direbbe che lo fa apposta per fare il « Bastian contrario » ai tubi... Si può d'altronde ammettere che la resistenza d'entrata è bassa perchè è quella della giunzione emettitore-base attraversata dalla corrente diretta. Mentre la giunzione base-collettore è faticosamente raggiunta dalla corrente nel senso sfavorevole, ciò che determina una forte resistenza d'uscita.

Cur. - Questo modo di vedere è perfettamente legittimo. Ma temo che per oggi, la vostra provvista di fosforo, sarà quasi esaurita... e la vostra resistenza d'entrata diviene enorme.

SETTIMA CONVERSAZIONE

Nel corso della loro ultima conversazione, Curioso e Ignoto hanno passato in rivista le principali caratteristiche dei transistori.
Queste, lo si è visto, possono essere espresse mediante valori numerici di diversi rapporti, o meglio, da sistemi di curve mostranti come certe grandezze variano sotto l'azione di certe altre.
La rappresentazione grafica da, per le proprietà dei transistori, un quadro più completo che le caratteristiche numeriche, le quali non sono valide che in condizioni ben determinate.
Poichè, nei transistori, non esitiamo a dirlo, tutto è interdipendente...
In questa conversazione i nostri due amici sapranno dedurre dalle famiglie di curve, delle preziose conoscenze sul funzionamento reale del transistore come amplificatore, in relazione ad una determinata impedenza di carico.
Cammin facendo, essi studieranno ugualmente il problema della polarizzazione con le sue soluzioni pratiche.

SOMMARIO: Caratteristiche statiche e dinamiche — Tracciatura della retta di carico — Punto di funzionamento — Amplificazione in corrente, in tensione ed in potenza — Valori massimi della componente alternativa — Tensione di protezione — Scelta dell'impedenza di carico — Pendenza dinamica — Polarizzazione di base.

DELLE RETTE E DELLE CURVE

IL TRANSISTORE NON E' SOLO AL MONDO

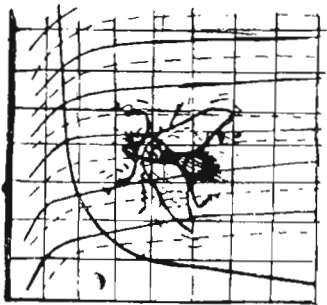
Ignoto. - Dal nostro ultimo incontro non ho avuto altro che atroci dispiaceri. Sogno di essere una mosca presa in una ragnatela gigante costituita da reti di curve dei transistori. Mi dibatto disperatamente senza poterne sfuggire... Non è spaventoso?

Curioso. - Sono desolato d'aver così turbato le vostre notti... Volete allora rinunciare a parlare di queste famose curve?

Ign. - Al contrario. Vorrei piuttosto che voi mi spiegaste il modo di servirsene nelle condizioni di reale impiego dei transistori.

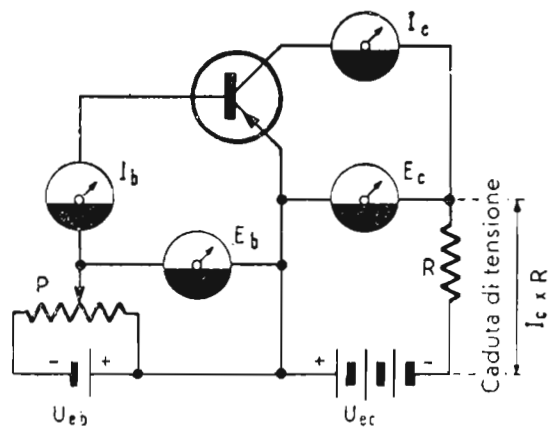
Cur. - Cosa volete intendere con ciò?

Ign. - Voi avete rilevato queste curve variando la tensione E_c applicata fra collettore ed emettitore. E l'avete fatto per diversi valori di corrente di base I_b (o ciò che è lo stesso per diversi valori di tensione di base E_b). Ma in realtà, il nostro transistore non vive come un egoista, isolato dal mondo intero, facendo variare le sue tensioni e correnti pel puro piacere di farlo... Il suo compito è di fornire delle tensioni o delle correnti ad un altro transistore costituente lo stadio successivo d'un amplificatore. Oppure se è l'ultimo della serie, deve fornire dei Watt ad un altoparlante. In ogni modo, deve sempre ave-

re nel suo circuito di collettore un'impedenza di carico. Così, nel caso in cui è seguito da un'altro stadio d'amplificazione e che il loro accoppiamento sia a resistenza-capacità, deve avere una resistenza R fra il collettore e la batteria U_{ec}.

Cur. - Esatto. Ma cos'è che vi turba in tutto ciò?

ANCORA LA BATTERIA DI CUCINA

Ign. - E' che le mie tensioni sul collettore dipendono ora dall'intensità della corrente di collettore. Infatti, la vera tensione E_c fra collettore ed emettitore è più piccola di quella della pila U_{ec}, poichè si deve sottrarre la caduta di tensione che la corrente I_c produce nella resistenza di carico R. Così se una variazione di corrente di base determina un aumento della corrente di collettore, la caduta di tensione in R sarà maggiore, a detrimento della tensione che rimane sul collettore.

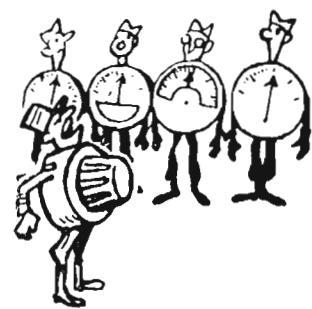
Fig. 49 - Per rilevare le caratteristiche di funzionamento reale di un transistore, conviene completare il dispositivo della figura 42, con una resistenza di carico R inserita nel circuito di collettore.
(D'ora in poi, il transistore sarà rappresentato negli schemi dal suo simbolo convenzionale).

Cur. - Giustissimo, Ignoto. E capisco anche cosa vi turba: i vostri sistemi di curve non tengono apparentemente conto di questi fenomeni.

Ign. - Penso sempre più alla mia batteria di cucina con tutte le pentole collegate fra di loro... A causa della presenza di questa resistenza di carico, tutto è collegato nelle nostre correnti e tensioni. Muovete il potenziometro P e vedrete gli indici dei vostri quattro strumenti di misura agitarsi in uno slancio unanime, come dei soldati agli ordini di un ufficiale.

UNA RETTA FRA LE CURVE

Cur. - Tentiamo di mettere un po' d'ordine in tutto ciò. Prendiamo il caso di un transistore di piccola potenza, diciamo da 75 mW, del quale ecco qui le curve, compresa in tratteggio quella del limite di potenza da non superare. Supponiamo che la pila U_{ec} alimentante il collettore sia di 9 V. Ditemi, quale sarà la tensione che si troverà sul collettore?

Ign. - Se non si produce alcuna caduta di tensione in R. Cioè se la corrente I_c è nulla.

Cur. - Ecco quindi un primo punto A, che incominciamo a segnare sul nostro grafico per $E_c = 9$ V e $I_c = 0$. Ammettiamo ora che la nostra resistenza R sia di 275 Ω. Potete calcolare per quale valore

di corrente di collettore non rimarrà più alcuna tensione su detto collettore?

Ign. - Certamente. Applicando la legge di Ohm, posso trovare l'intensità I_c che, in una resistenza R di 275 Ω, determinerà una caduta di tensione E di 9 V, in modo da annullare la tensione della pila U_{ec}:

$$I_c = \frac{E}{R} = \frac{9}{275} = 0{,}0327 \text{ A} = 32{,}7 \text{ mA}$$

Cur. - Perfetto. Ciò ci permette di segnare il nostro secondo punto B per $E_c = 0$ e $I_c = 32{,}7$ mA.

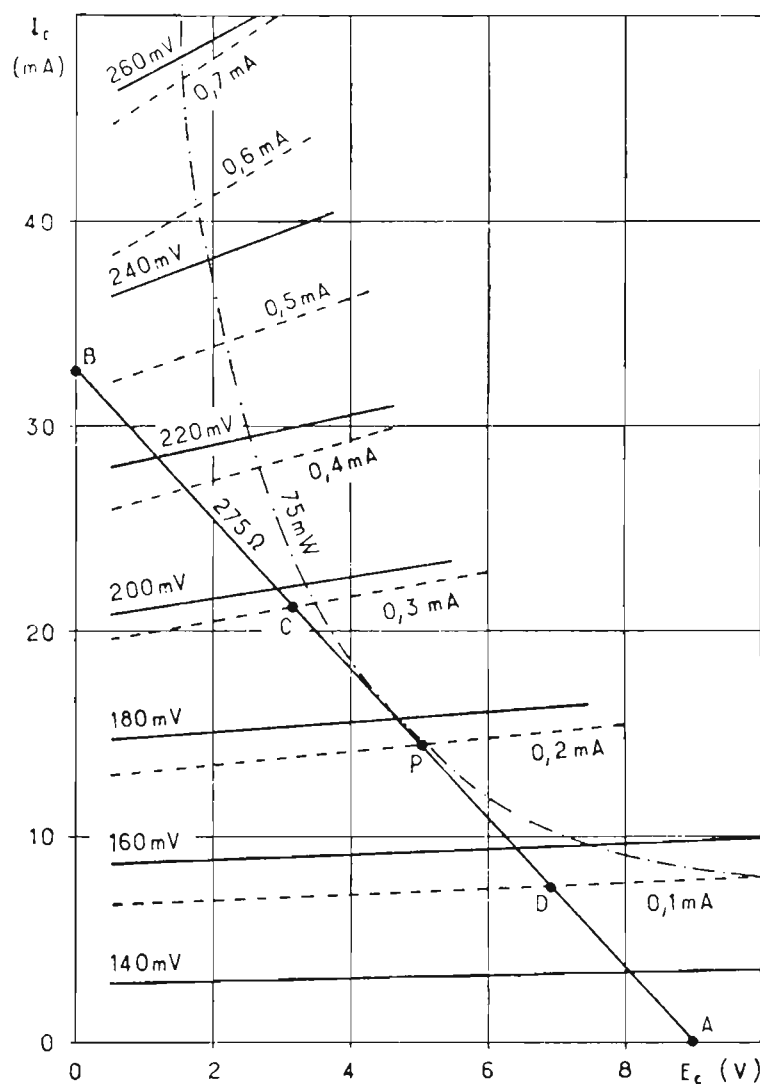
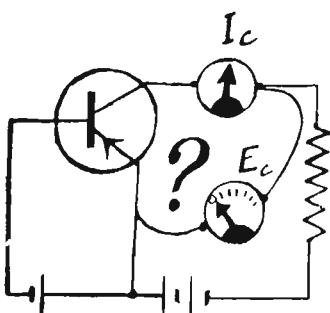



Fig. 50 - Curve di un transistore di piccola potenza.

Non rimane altro che prendere un regolo e riunire i nostri due punti A e B con una bella retta che è poi la « *retta di carico* » per 275 Ω.

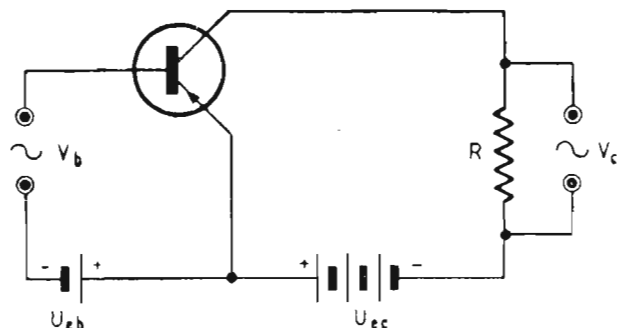
Ign. - Ed eccoci a buon punto! Però non riesco a vedere a cosa corrisponda questa « retta di carico ». E, per incominciare, come è possibile che la corrente di collettore raggiunga questi 32,7 mA, se in quel momento non vi è più alcuna tensione sul collettore?

Cur. - La vostra confusione deriva dal fatto che non stabilite una differenza fra le *caratteristiche statiche* e le *caratteristiche dinami-*

che. Le prime mostrano come variano le tensioni e le correnti che ci interessano, in assenza di un carico nel circuito di collettore. E' ciò che noi abbiamo già esaminato assieme nella nostra precedente conversazione. Oggi vogliamo vedere ciò che accade quando un carico è posto nel circuito del collettore e, ciò che noi abbiamo sin qui omesso di precisare, quando una tensione alternativa V_b è applicata all'entrata, cioè fra la base e l'emettitore. Pertanto sono le caratteristiche dinamiche che governano il funzionamento del transistore; e la retta di carico che abbiamo tracciato permette di determinarle.

LE DUE COMPONENTI

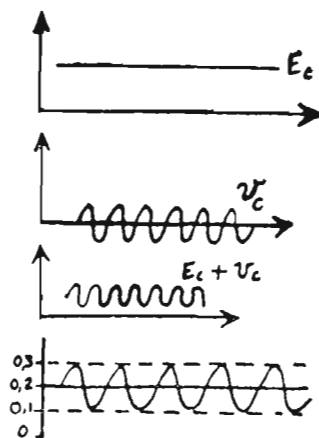
Ign. - Vedo sul vostro schema che la tensione alternativa d'entrata V_b dà luogo alla tensione alternativa d'uscita V_c. Ed incomincio ad intravedere la verità. Accade qui, nel circuito di collettore, la stessa cosa che nel circuito anodico dei tubi elettronici: la coesistenza pacifica di due correnti. Vi è da un lato, una componente continua, questa corrente media che è determinata dal punto di funziona-

Fig. 51 - All'entrata di uno stadio con transistore, si ha una tensione alternativa v_b applicata fra base e emettitore. All'uscita, sulla resistenza di carico *R*, si raccoglie una tensione alternativa v_c.

mento (eventualmente la polarizzione di griglia). Poi vi è la componente alternativa, dovuta alle variazioni del potenziale di griglia nei rispetti del catodo. E le sue alternanze vengono sia a sommarsi alla componente continua (quando entrambe sono dirette nello stesso senso), sia a sottrarvisi.

Cur. - Ora si comincia ad andare meglio, Ignoto... Effettivamente si verifica la stessa cosa nel transistore. La pila U_{eb} fissa il punto di funzionamento. Si procura di situarlo in modo che i picchi della tensione variabile V_c sviluppata all'uscita possono avere la più grande ampiezza possibile.

Ign. - In questo caso dovremo fare in modo che la tensione media E_c sul collettore, sia uguale alla metà della tensione d'alimentazione U_{ec}. Nel nostro caso sarà la metà di 9 V, cioè 4,5 V.

Cur. - Segno quindi un punto *P* nella nostra retta di carico, a $E_c = 5$ V. Si trova così all'incirca a metà della nostra retta. Vedremo fra poco che si può adottare un valore leggermente superiore alla metà di U_{ec}. Pertanto se una variazione della tensione base-emettitore (o ciò che è lo stesso, una variazione della corrente di base) determina delle variazioni della corrente I_c e della tensione E_c di collettore, queste due grandezze saranno sempre legate dalla relazione espressa dalla nostra retta.

Ign. - Ciò è molto filosofico, ma preferirei un esempio concreto.

IL GIUOCO DELL' ALTALENA

Cur. - Ebbene, supponete di applicare fra base ed emettitore una tensione alternativa d'una ampiezza di circa 20 mV, che crei delle variazioni di corrente di base di una ampiezza di 0,1 mA da una parte e dall'altra della corrente media, che, al punto *P*, è di 0,2 mA.

Ign. - Di modo che la corrente di base oscillerà fra:

$$0{,}2 + 0{,}1 = 0{,}3 \text{ mA e } 0{,}2 - 0{,}1 = 0{,}1 \text{ mA}$$

Cur. - Molto bene. Per il primo valore raggiungeremo sulla retta di carico, il punto *C* (dove essa taglia la curva $I_b = 0{,}3$ mA). E per la seconda, passeremo al punto *D* (incrocio con la curva $I_b = 0{,}1$ mA).

Ign. - Di modo che i valori istantanei di E_c e I_c oscilleranno fra questi due punti *C* e *D*, lungo la retta di carico come se essi facessero l'altalena attorno al punto d'equilibrio *P*?

Cur. - Proprio così. Vedete che la tensione di collettore oscilla fra 3,2 V e 6,8 V attorno al punto *P* che è a 5 V.

Ign. - Questo significa un'ampiezza di 1,8 V. E poichè ciò corrisponde ad un'ampiezza di 20 mV = 0,02 V sulla base, posso concludere che abbiamo un'amplificazione di tensione di 1,8/0,02 = 90 volte?

Cur. - Non ve lo impedisco proprio. E per l'amplificazione in intensità?

Ign. - Non è molto più difficile. Fra i punti *C* e *P* da un lato e *P* e *D* dall'altro, la corrente I_c di collettore varia di 7 mA. Questa variazione è provocata da una variazione di 0,1 mA della corrente di base. Per conseguenza, l'amplificazione in intensità è di 7/0,1 = 70 volte.

Cur. - Comincio a credere che voi avete già ben rifornito di fosforo il vostro cervello, facendo man bassa in una pescheria... Ora comprendete che la potenza, che è il prodotto della tensione per la intensità, è stata dal canto suo amplificata...

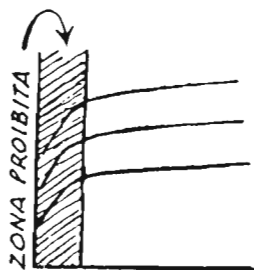
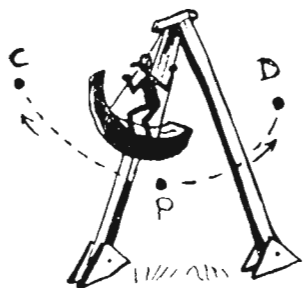
Ign. - ... 90 × 70 = 6300 volte. Ma è prodigioso!

CORSA ALLE DISTORSIONI

Cur. - Nulla di più normale! Ma ciò che vorrei farvi capire, è che non dobbiamo mai superare un'ampiezza di 4,5 V per la tensione alternativa V_c, sul collettore. Con tale ampiezza, i valori di E_c e I_c viaggiano lungo la retta di carico, da *A* a *B*. Infatti, ammettendo che il punto di funzionamento sia posto nell'esatto punto di mezzo di *A-B*, una delle alternanze raggiungerà uno di questi punti e l'altra alternanza si porterà sull'altro punto.

Ign. - Insomma, sono i limiti dei valori istantanei della tensione E_c del collettore?

Cur. - Certamente. Ed infatti non è necessario che essa cada a zero raggiungendo il punto *B*. Poichè le curve caratteristiche del sistema, cessano in quel punto di essere rette.

Avete visto nella figura 46 e meglio ancora nella figura 47, come esse si inflettano in corrispondenza di piccoli valori di E_c. Ecco perchè rimane una zona di qualche decina di volt, detta « *tensione di protezione* » che è interdetta sotto pena di distorsioni.

Ign. - Si può quindi fissare il punto *P* non alla metà della tensione della U_{cc}, ma ad un valore un po' più elevato?

Cur. - Certo, se vuoi essere rigoroso. E' per questa ragione che lo abbiamo posto a 5 V (1).

Ign. - Ho l'impressione che non è proprio a caso che avete preso un valore di 275 Ω per la resistenza di carico *R*. Cosa sarebbe successo con un valore differente?

VENTAGLIO DI RETTE

Cur. - Ecco alcune rette di carico per dei valori superiori o inferiori. Per 1000 Ω otteniamo delle potenze più piccole e disponiamo di una minore ampiezza di variazioni delle correnti, sia all'entrata

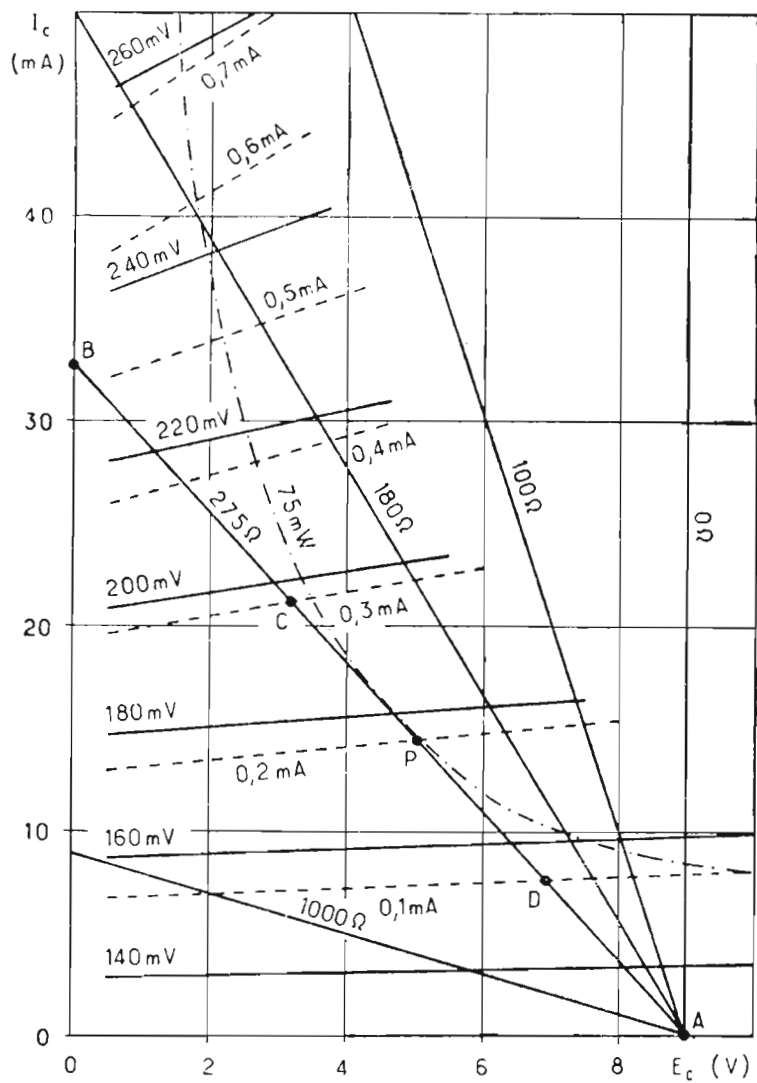



Fig. 52 - Rette di carico per differenti valori di *R*. La loro inclinazione è tanto maggiore quanto *R* è più piccola. Per *R* nulla, la retta si dispone verticalmente.

(base), che all'uscita (collettore). Per contro, per dei valori inferiori a 275 Ω, le ampiezze e le potenze aumentano... ma entriamo ora nel dominio interdetto delle potenze superiori a 75 mW.

Ign. - Ecco perchè, maligno come siete avete scelto questo valore di 275 Ω che vi permette di avere una retta di carico tangente al-

(1) Curioso bluffa un po': se ha posto *P* a 5 V, è soprattutto per avere questo punto sulla curva $I_b = 0{,}2$ mA, ciò che facilita la lettura dei diversi valori delle tensioni e delle correnti (Nota dell'Autore).

l'iperbole che indica la potenza limite... Vedo che avete anche tracciato la retta di carico per R uguale a zero.

Cur. - Sì, Ignoto. E questa bella retta, perfettamente verticale, è fra tutte le nostre caratteristiche dinamiche, l'unica caratteristica statica. In assenza della resistenza di carico, la tensione sul collettore non dovrebbe rimanere costante ed invariabile?

Ign. - Evidentemente. Ma non abbiamo forse studiato assieme che le impedenze di carico altro non erano che una volgare resistenza ohmica? Ho ancora in mente questa bella famiglia d'impedenze che mi faceste conoscere e che comprendeva delle induttanze e dei circuiti risonanti.

Cur. - Avete perfettamente ragione di parlarmene. Beninteso per questo genere di impedenze, si può fare astrazione dalla loro resistenza ohmica in corrente continua. In queste condizioni, il punto di

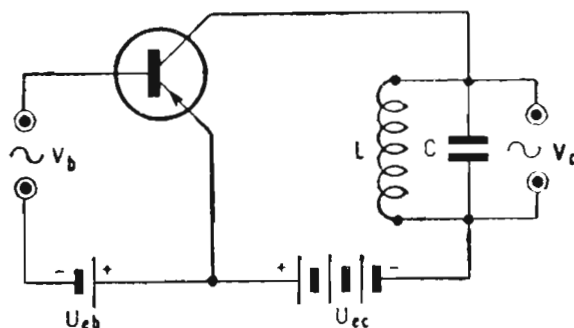
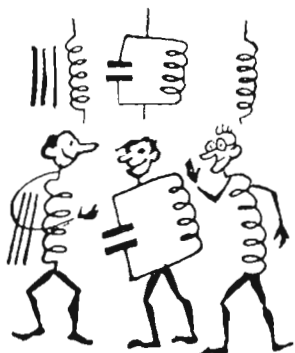



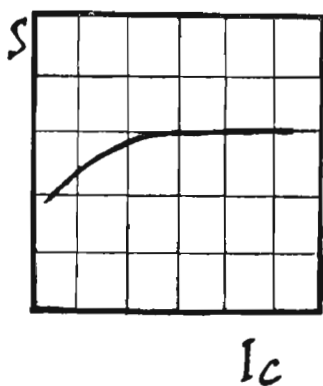
Fig. 53 - Il carico può essere costituito da un'impedenza o da una resistenza ohmica. In questo schema è rappresentato da un circuito accordato sulla frequenza del segnale.

funzionamento del collettore si trova alla stessa tensione della sua batteria d'alimentazione U_{ec}. Si potrà allora, senza alcun rischio d'invertire la polarità del collettore, sviluppare nella nostra impedenza delle tensioni la cui ampiezza può raggiungere il valore della tensione U_{ec}. Ed il punto A dove la retta di carico taglia l'asse orizzontale E può allora essere situato ad un valore doppio della tensione della batteria U_{ec}. Così, nel caso in cui questa sia di 9 V, il punto A sarà posto a 18 V.

Ign. - Riassumendo allora; per tracciare una retta di carico, fisso dapprima il punto A sull'asse orizzontale per U_{ec} ovvero 2 U_{ec}, a seconda che l'impedenza è una semplice resistenza ohmica oppure no, e segno il punto B sull'asse verticale al valore U_{ec}/R, oppure $I_c = 2$ U_{ec}/Z secondo il genere dell'impedenza.

Cur. - Avete perfettamente enunciato la regola e spero che sarete in grado di tracciare delle rette di carico senza la minima difficoltà. E saprete anche dedurne una quantità di cognizioni. Nulla di più facile, per esempio, di tracciare, dopo quanto appreso, la curva che mostra come la corrente di collettore I_c, varia in funzione della tensione di base E_b. Sarà sufficiente rilevare, sulla retta di carico, i valori di I_c per tutti i punti in cui essa taglia le curve E_b, e riportarli in un grafico. Vedrete che ne otterrete una retta. Ciò indica che le variazioni della pendenza sono piccole quando si tratta di valori elevati della corrente di collettore. Il transistore amplifica allora in modo assolutamente lineare.

Ign. - E constato che la pendenza è in questo caso di 300 mA/V.

Cur. - Sì. E' la *pendenza dinamica.* Voi avreste potuto, con la stessa facilità, tracciare la curva che mostra le variazioni di I_c in funzione di I_b.

Ign. - Sicuramente. Ma, come una mosca presa in una ragnatela, anelo di uscire da questa rete di curve che mi fanno, da sveglio, rivivere le mie ansie notturne... Ma da qualche istante ho una domanda sulla punta della lingua. In tutti i vostri schemi, voi fate sempre figurare due batterie: U_{ec} che dà la tensione al collettore e U_{eb} che

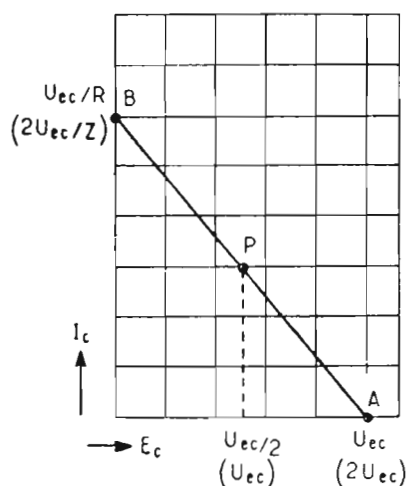



Fig. 54 - Regola generale per il tracciamento delle rette di carico.

Fra parentesi sono indicati i valori nel caso di impedenze Z di bassa resistenza ohmica.

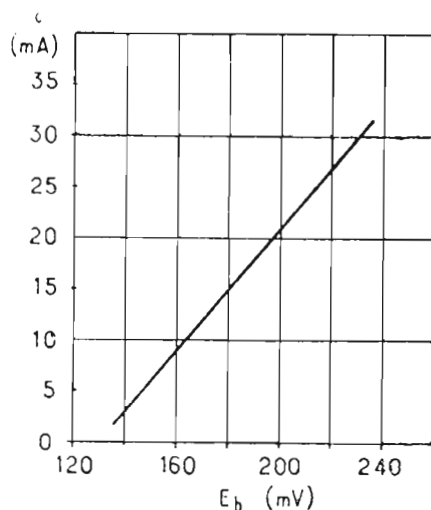



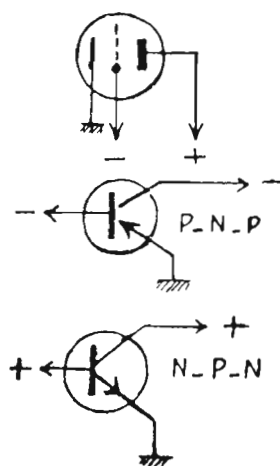
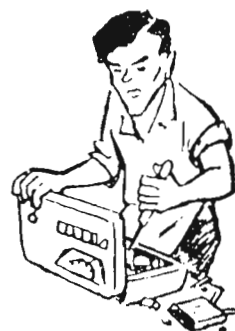
Fig. 55 - Questa curva, che mostra le variazioni della corrente di collettore I_c in funzione della tensione di base E_b, è tracciata in base ai valori di queste due grandezze ricavate dalla retta di carico della figura 50.

serve a polarizzare convenientemente la base. Ora, ho osservato che in tutti i ricevitori a transistori dei miei amici non vi è che una sola batteria, sia da 4,5 V, sia da 6 V, sia da 9 V. E' evidentemente quella che alimenta il collettore. Da dove viene allora la tensione di polarizzazione per la base?

Cur. - Da quella stessa batteria. Non si verifica forse lo stesso per i tubi?

Ign. - Effettivamente è la sorgente di corrente anodica che crea la tensione di polarizzazione di griglia; la corrente anodica provoca una caduta di tensione in una resistenza posta fra il ritorno di griglia ed il catodo, rendendo quest'ultimo positivo nei rispetti della griglia, ciò che equivale a rendere la griglia negativa nei rispetti del catodo... Si fa la stessa cosa nel transistore, creando una caduta di tensione in una resistenza posta sul percorso della corrente di collettore?

Cur. - No, Ignoto. Per il transistore le cose sono questa volta, più semplici di quelle per i tubi. In questi, l'anodo deve essere positivo e la griglia negativa nei rispetti del catodo. Per contro, in un transistore *P-N-P*, sia il collettore, che la base devono essere negativi nei rispetti dell'emettitore.

Ign. - Parimenti, in un tipo *N-P-N*, collettore e base dovranno entrambi essere positivi nei rispetti dell'emettitore. Non sbaglio quindi nel supporre che è sufficiente collegare ai capi della nostra batteria

un divisore di tensione costituito da due resistenze R_1 e R_2 per procurare alla base la tensione di cui ha bisogno.

Cur. - Esatto, amico mio. E per applicare alla base le tensioni alternative d'entrata, si utilizza un condensatore di collegamento *C*. Si può però, assicurare la polarizzazione della base ancor più semplicemente, mediante una sola resistenza R_p, collegandola al polo della batteria che alimenta il collettore, polo negativo nel caso di un transistore *P-N-P* (o positivo per il tipo *N-P-N*).

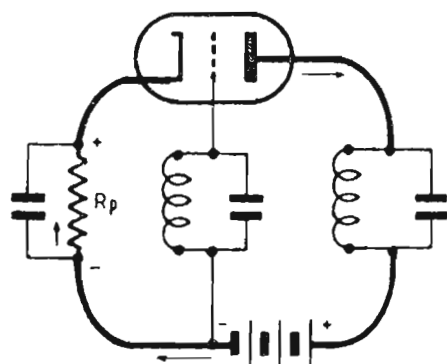



Fig. 56 (qui sopra) - E' così che in uno stadio a tubo elettronico, la polarizzazione della griglia è assicurata dalla caduta di tensione che la corrente anodica determina nella resistenza R_p.

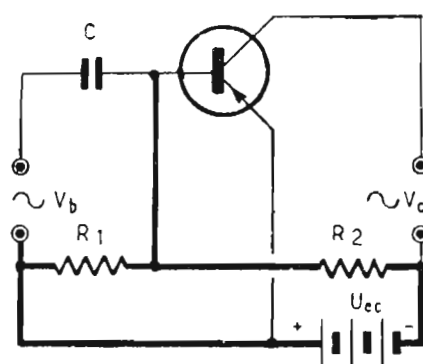
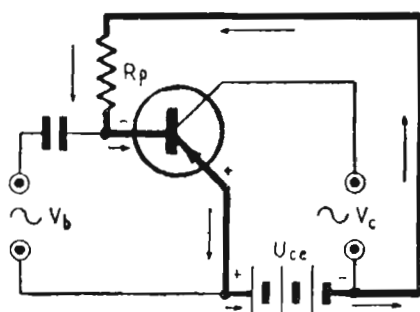



Fig. 57 (in alto a destra) - Sistema di polarizzazione della base mediante l'ausilio di un divisore di tensione.

Fig. 58 - Molto sovente, la polarizzazione è assicurata da una resistenza R_p in serie con la giunzione base-emettitore.

Ign. - Intravedo già, ciò che avviene. Attraverso R_p passerà una corrente diretta dalla base verso l'emettitore.

Cur. - E questa corrente, Ignoto, è chiamata *corrente di polarizzazione*. Ed è evidentemente questa corrente che determina il punto di funzionamento. Così, nel caso del punto *P* della figura 50, si tratta di una corrente di 0,2 mA (0,0002 A). Con una pila di 9 V e trascurando la resistenza della giunzione base-emettitore (che è piccola nel senso della conduzione) quale dovrà essere il valore di R_p?

Ign. - Se si deve credere nella legge di Ohm, otterremo R_p dividendo 9 per 0,0002, ciò che dà 45.000 Ω.

Cur. - Vedete dunque che tutti i nostri calcoli non superano in difficoltà una semplice moltiplicazione o divisione...

Ign. - Ciò non impedisce però che mi senta la testa pesante, così come è imbottita di curve, di rette e di un malloppo di grandezze elettriche.

Speriamo che passi prima della nostra prossima conversazione...

OTTAVA CONVERSAZIONE

Nei circuiti a tubi elettronici si ricorre volontieri alla controreazione, allo scopo di ridurre le distorsioni e di attenuare l'influenza delle fluttuazioni delle tensioni d'alimentazione. Nel caso dei circuiti a transistori, la controreazione è capace di rendere gli stessi servizi. Inoltre essa può neutralizzare, in una certa misura l'azione delle variazioni di temperatura alle quali i semiconduttori sono, come è noto, molto sensibili. Esaminando queste diverse applicazioni della controreazione, i nostri giovani amici constateranno nel contempo, che il transistore è, per la sua stessa natura, dotato di una certa controreazione interna.
Ciò che prova, più che mai l'interdipendenza naturale dei fenomeni...

SOMMARIO: I benefici della controreazione — Controreazione d'intensità e di tensione — Circuiti a tubi ed a transistori — Azione della controreazione sulle resistenze d'entrata e d'uscita — Distorsione di fase introdotta dai transistori — Controreazione interna — Effetti di temperatura sulla distorsione — Loro compensazione mediante la controreazione — Impiego di termistori.

RIMBALZI

LA REALTA' SUPERA LA FINZIONE

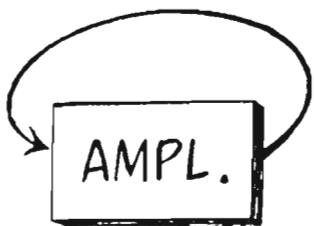
Curioso. - Cosa vedo, Ignoto? State bruciando un mucchio di libri. Cosa significa questa decisione?

Ignoto. - Distruggo la mia biblioteca di fantascienza. A che serve conservare queste opere di anticipazione, dato che la realtà ha largamente superato l'immaginazione dei loro autori? Ed a questo proposito, vorrei porvi una domanda circa quegli immensi palloni che all'altezza di 35.000 chilometri, girano attorno alla Terra, alla velocità di un giro ogni 24 ore, di modo che essi rimangono sempre sopra il medesimo punto del globo.

Cur. - Voi sapete bene che essi permettono di stabilire delle comunicazioni radioelettriche a lunga distanza, per riflessione delle onde contro la loro superficie metallizzata, e che si può così realizzare dei collegamenti a lunga portata per la televisione.

Ign. - Questo lo sapevo. Ma ciò che mi preoccupa in questa faccenda di satelliti artificiali, è il fatto che i palloni vengono gonfiati solamente quando sono posti in orbita, ciò che, immagino, complica un poco le cose.

Cur. - Vediamo, Ignoto! Non avete capito che un pallone di un tale diametro sarebbe assolutamente incapace di muoversi ad una velocità di più di 11 chilometri al secondo attraverso l'atmosfera terrestre? Per contro, nel vuoto che esiste all'altezza della sua orbita, nulla si oppone al suo moto.

Ign. - Confesso che ciò è chiaro come il sole ed ho vergogna di

non avervi pensato. Inoltre conosco bene l'ottima vecchia legge di Newton, secondo la quale ogni azione incontra una azione in senso opposto e dello stesso valore. E' insomma, la controreazione che noi abbiamo a suo tempo studiato in radio.

QUESTIONI DI CORREZIONE

Cur. - Non proprio così, amico mio. Certo che la controreazione presuppone anch'essa un'azione in senso inverso che contrasta una data azione (altrimenti detta una opposizione di fase). Ma non si deve dimenticare che, quale noi la concepiamo, è realizzata reinserendo all'entrata di un amplificatore, una parte dell'energia prelevata all'uscita. Vi è quindi...

Ign. - ... una specie di rimbalzo. E' un poco quello che mi accade quando commetto una sciocchezza e che per correggermi, io stesso, ho immaginato di darmi dei calcioni in qualche posto...

Cur. - La parola « correggere » è proprio appropriata. Effettivamente, ve lo ricordo, la controreazione è una specie di panacea; essa riduce tutte le distorsioni: quelle lineari (in funzione della frequenza), quelle non-lineari (che dipendono dall'ampiezza ed introducono delle armoniche indesiderabili) ed infine le distorsioni di fase.

Ign. - Sì, me ne ricordo. Tutto ciò è attenuato dal fatto che la tensione d'uscita che si reinserisce all'entrata in opposizione di fase, contiene naturalmente tutte queste distorsioni. Esse vanno dunque in senso contrario, annullando in fine dei conti, tutte le alterazioni che nascono nell'amplificazione.

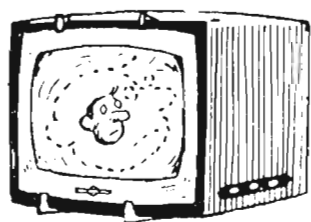
Cur. - Bravo, Ignoto! Voi non avete dimenticato nulla. Sapete che, per di più, la controreazione attenua le perturbazioni che possono essere dovute alle variazioni delle tensioni di alimentazione?

Ign. - Ma è magnifico. Sarà necessario che aggiunga dei circuiti di controreazione in tutti gli stadi del televisore istallato nella nostra casa di campagna. La rete elettrica è laggiù molto instabile. E l'immagine subisce delle fluttuazioni molto strane: talvolta essa è troppo scura, talvolta troppo luminosa. Inoltre, anche le sue dimensioni variano e vedo le teste dei personaggi, sullo schermo, dilatarsi o restringersi... ciò che non manca di un certo umorismo.

Cur. - Ebbene, la controreazione è un buon rimedio a questo stato di cose, poichè ogni perturbazione che si manifesta all'uscita per una qualsiasi deformazione, viene corretta reinserendo il segnale deformato all'entrata. Comunque, nel vostro caso, uno stabilizzatore di tensione collocato fra la presa di corrente ed il televisore, sarebbe più indicato.

Ign. - Perchè? Dato che la controreazione non presenta che dei vantaggi!

RITORNO ALLE VALVOLE

Cur. - Siete ancora molto giovane, amico mio. E non sapete ancora che a questo mondo, tutto si paga. Se la controreazione riduce le distorsioni, riduce però ugualmente il guadagno degli amplificatori.

Ecco perchè il suo impiego è solo possibile quando si disponga di un sufficiente margine di guadagno... Sareste in grado, Ignoto, giacchè se ne parla, di tracciare gli schemi dei principali modi di controreazione usati negli amplificatori a valvole?

Ign. - Si può fare della controreazione, inserendo fra il catodo ed il negativo della sorgente di tensione anodica, una resistenza R_r priva di condensatore di disaccoppiamento. E' quasi, salvo un piccolo dettaglio, lo stesso schema adottato per la polarizzazione per resistenza nel circuito catodico, che avevo tracciato nel corso della nostra ultima conversazione (fig. 56).

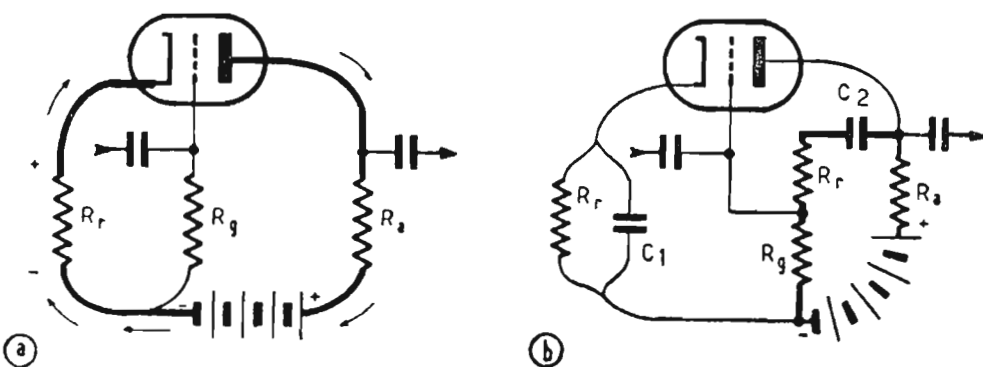



Fig. 59 - Controreazione in uno stadio a tubo elettronico. In *a*, controreazione d'intensità determinata dalla presenza di una resistenza comune R_r nei circuiti di griglia e di anodo. In *b*, controreazione di tensione ottenuta applicando alla griglia una frazione della tensione alternativa sviluppata sulla resistenza di carico R_a e prelevata attraverso C_2 dal divisore di tensione R_r - R_g. Questo modo di presentare gli schemi non è abituale; ha però il vantaggio di essere chiaro, mettendo in evidenza il meccanismo della controreazione.

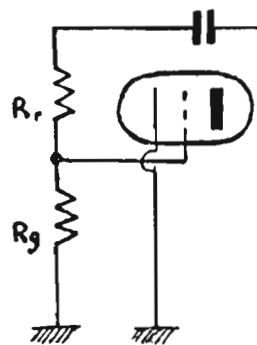
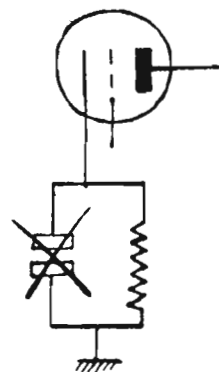
Ma questo « piccolo dettaglio » cambia tutto. Ora, quando una tensione rende la griglia più positiva, la corrente anodica cresce e, attraversando R_r, aumenta la caduta di tensione, ciò che rende la griglia più negativa, tende cioè ad opporsi all'azione iniziale del segnale.

Cur. - Ma è meraviglioso, Ignoto. Voi incominciate a spiegarvi così chiaramente come il mio caro Radiolo, che tempo fa, mi aveva inculcato i principi elementari della radio... Effettivamente il vostro primo circuito assicura la controreazione sotto l'azione della corrente anodica.

Ecco perchè la si chiama « *controreazione di corrente in serie* ».

Ign. - In questo caso, occorrerà chiamare « *controreazione di tensione derivata* », quella che si produce nel mio secondo schema. Poichè qui, reinserisco verso la griglia le tensioni alternative sviluppate nella resistenza d'uscita R_a. E lo faccio mediante l'ausilio di una resistenza R_r. E beninteso, separo le tensioni continue per mezzo del condensatore C_2.

Cur. - Esatto. Ed applicate alla griglia la totalità della tensione d'uscita?

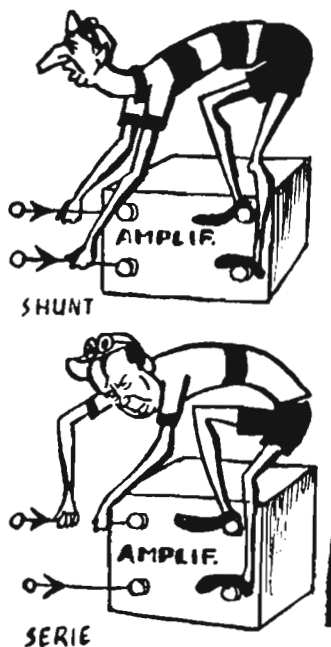
Ign. - Mai più! Sarebbe eccessivo. Infatti le resistenze R_r e R_g costituiscono un divisore di tensione che permette di applicare alla griglia solo una frazione della tensione d'uscita, che rimane su R_g. E

siccome si prende R_r di valore molto più elevato di R_g, la griglia non riceve che una piccola parte della tensione d'uscita (1).

PASSANDO AL TRANSISTORE

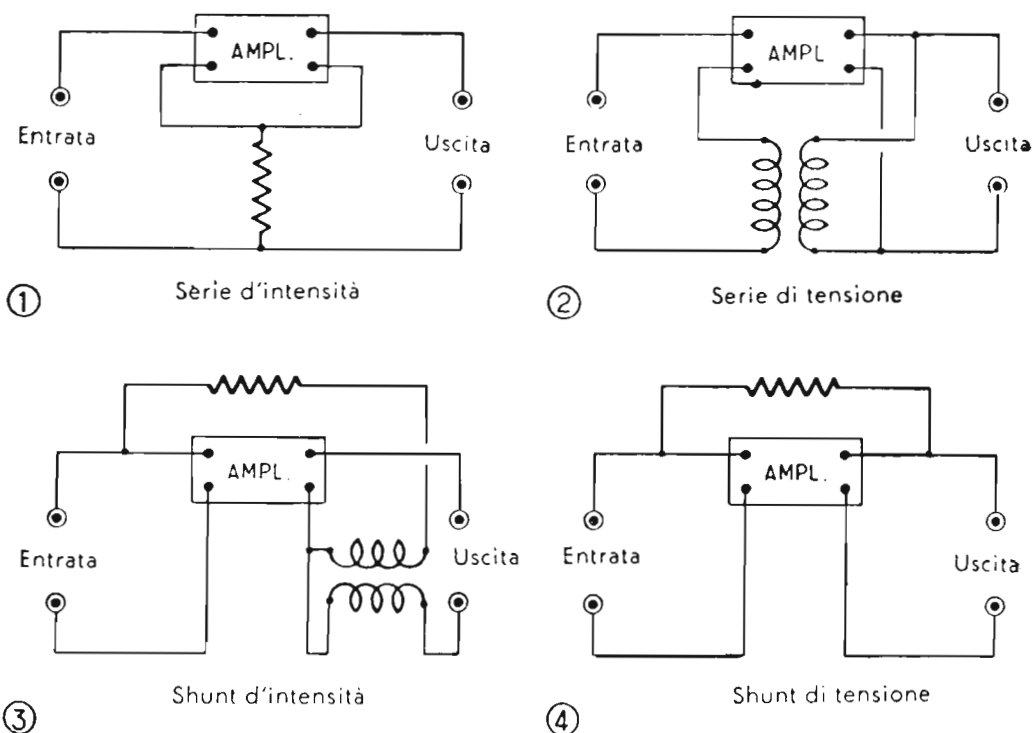
Cur. - In virtù delle vostre chiarissime spiegazioni, mi avete grandemente semplificato il compito. Poichè, (il caso fa veramente bene le cose) stavo proprio per parlarvi della controreazione nei transistori.

Ecco qui gli schemi di controreazione d'intensità e di controreazione di tensione, applicata ai triodi a cristallo. Vengono anche indicati con « controreazione serie » e « controreazione parallelo ».

Ign. - Lasciate che mi orienti. Nel nostro primo schema, vedo una resistenza R_r, che è comune ai circuiti di base e di collettore. E' esattamente come nel mio schema a valvole, ove la resistenza di controreazione era comune ai circuiti di griglia e di anodo. La sua azione dovrà quindi essere identica. Se lo permettete, vorrei ora ricorrere al vostro metodo già sperimentato, delle polarità.

Cur. - Ve ne prego, vivamente.

(1) Infatti, si possono distinguere quattro modi di controreazione, schematizzati nei nostri schizzi.

La controreazione può essere applicata all'entrata dell'amplificatore, sia in *serie*, sia in *parallelo*, nei rispetti del segnale iniziale.

Essa può essere generata dalla corrente d'uscita (controreazione d'*intensità*) ovvero dalla *tensione* ch'essa sviluppa sull'impedenza d'uscita.

I modi 1 e 4 sono i più correntemente impiegati nel caso di un unico stadio. Si usano invece i modi 2 e 3 negli stadi con trasformatore d'uscita e quando si applica la controreazione su due stadi (vedasi, per esempio, la figura 61) ove si utilizza una controreazione in serie di tensione.

Ign. - Ammettiamo che una alternanza del segnale all'entrata, renda la base più negativa. La corrente di collettore aumenterà. Ed a causa della caduta di tensione in R_r, l'emettitore sarà reso più negativo nei rispetti della base, o, ciò che è lo stesso, la base diverrà più positiva nei rispetti dell'emettitore.

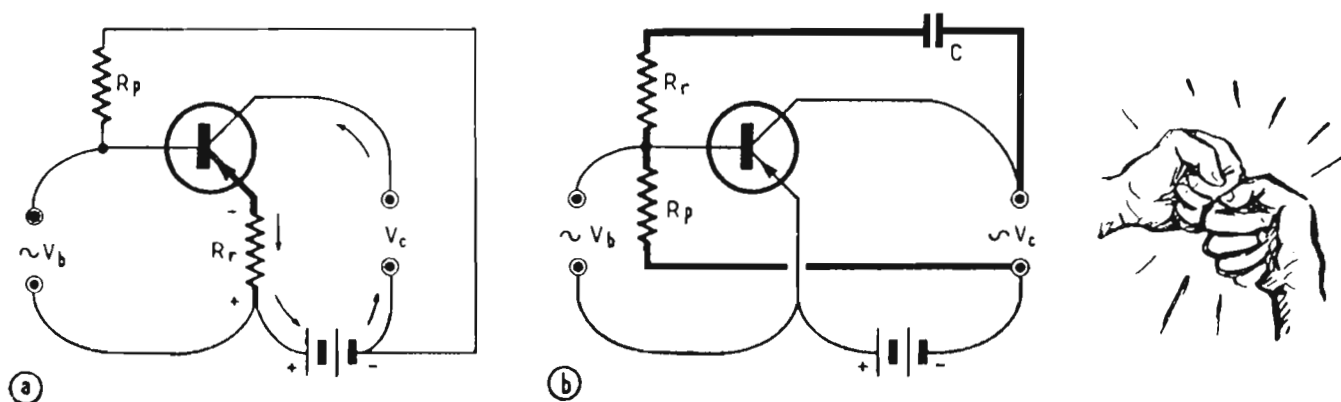



Fig. 60 - Trasposizione nel campo dei transistori dei due metodi di controreazione della fig. 59. In *a*, controreazione d'intensità (o circuito serie) con la resistenza R_r, comune ai circuiti di base e di collettore. In *b*, controreazione di tensione (o parallelo), ove una frazione della tensione di collettore viene reinserita nella base attraverso *C*, che alimenta il divisore di tensione R_r - R_p.

Ma allora, è proprio una controreazione, poichè il rimbalzo si produce nel senso opposto al colpo iniziale.

Cur. - Avete perfettamente inquadrato la situazione. Passiamo ora al secondo schema.

Ign. - Anche qui, l'analogia col circuito a tubo elettronico risulta evidente. Avete abilmente utilizzato la resistenza di polarizzazione della base R_p, per realizzare con la resistenza R_r, un divisore di tensione in derivazione sull'impedenza d'uscita. Di modo che una frazione della tensione di uscita V_c è applicata fra base e emettitore, cioè reinserita all'entrata del transistore e, beninteso, in opposizione di fase. Inoltre il condensatore *C*, pur lasciando passare le tensioni alternative, separa quelle continue; cosicchè il potenziale continuo della base, non dipende che dalla resistenza R_p.

Cur. - Perfetto. Notate, tra l'altro, che, se il condensatore *C* è di valore insufficiente, lascierà passare meno facilmente le frequenze basse, le quali, per questo fatto, subiranno l'effetto della controreazione in minor misura che le frequenze più alte.

Ign. - In altre parole, il guadagno sarà meno ridotto per le note basse, ciò che le favorirà. Ecco un sistema di controllo della tonalità, non molto leale a mio avviso, poichè le distorsioni sono meno neutralizzate.

Ma per rendere meno nasali ed acuti i suoni dei ricevitori portatili, questo sistema di controllo della tonalità è utilissimo.

Cur. - Vedo che i vostri accumulatori del cervello sono ben carichi di fosforo. Perciò non esito a chiedere loro un piccolo sforzo per dirmi come divengono le resistenze di entrata e d'uscita di un transistore, quando si applica la controreazione-serie.

ANCORA UN PO' DI « DELTA »

Ign. - Riprendiamo i nostri « delta ». La resistenza d'entrata, è il rapporto fra una piccola variazione della tensione di base ed una piccola variazione della corrente di base ch'essa provoca. Qui, a causa della controreazione, le stesse variazioni della tensione d'entrata, avranno un minor effetto sulla corrente di base. In altre parole, per un medesimo ΔE_b, avremo un ΔI_b più piccolo. Per conseguenza il loro quoziente, che è la resistenza d'entrata, aumenterà.

Cur. - Molto bene! Non vorrei però esaurire i vostri accumulatori mentali, perciò vi dirò che analizzando nello stesso modo, il comportamento della resistenza d'uscita, avreste potuto constatare che anch'esso aumenta a causa della controreazione. Nel caso della controreazione parallelo, essa provoca una diminuzione della resistenza di entrata e parimenti una leggera diminuzione della resistenza d'uscita.

Ign. - Sono vieppiù allarmato per la rassomiglianza che dimostra il transistore con la mia famosa batteria di cucina intercollegata. Quando si tocca qualcosa, tutto si mette in agitazione. E' proprio necessario introdurre la controreazione per complicare ancor più le cose?

Cur. - Non dovete credere, Ignoto, che lo si faccia unicamente per rendervi la vita difficile. La controreazione riduce le distorsioni che, nei transistori, sono altrettanto pericolose, quanto nei tubi. Ed ancor più per quanto riguarda le distorsioni di fase. Poichè nei transistori utilizzati per l'amplificazione a bassa frequenza, le capacità fra emettitore, base e collettore sono di valore relativamente elevato. Ciò equivale a dire che la fase dei segnali amplificati ne è influenzata. D'altra parte, allorchè la tensione delle pile che alimentano il circuito a transistori incomincia a calare, la controreazione, grazie al suo effetto regolatore, permette di utilizzare ancora, almeno sino ad un certo limite.

ANCORA UNA CONTROREAZIONE

Ign. - Evidentemente è molto preziosa e costituisce una reale fonte di economia.

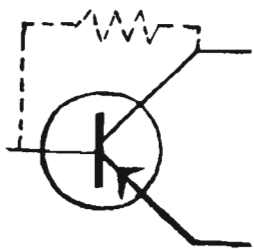
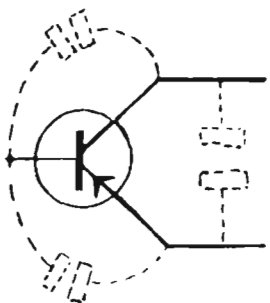
Cur. - Vedo che queste considerazioni di volgare danaro, vi riconciliano con la controreazione. Vi faccio comunque notare, che anche se non lo volete, sareste ugualmente costretto a subirla, presente e invisibile.

Ign. - Cos'è questo mistero?

Cur. - Il transistore presenta un fenomeno di *controreazione interna* quasi assente nelle valvole. Esso è dovuto all'esistenza della resistenza interna della giunzione base-collettore, il cui valore è di qualche centinaio di kiloohm.

Ign. - Ma come si manifesta allora questa controreazione interna?

Cur. - Trasmettendo alla base una piccola frazione delle tensioni alternative d'uscita.

Si può misurarla facendo variare la tensione di collettore (in assenza di un carico) e misurando la variazione che ciò provoca nella tensione di base. In generale, la variazione di E_b non rappresenta che qualche decimillesimo della variazione di E_c. In altre parole, il

tasso di *controreazione interna* è dell'ordine di 0,05% in media. Lo si indica con la lettera greca μ (mu).

Ign. - Ho la vaga sensazione che mi abbiate caritatevolmente risparmiata la definizione $\mu = \Delta E_b / \Delta E_c$, e ve ne ringrazio... Ma, dato che questo μ è così piccolo, la controreazione non eserciterà che un'influenza trascurabile.

Cur. - Certamente; alla condizione che la resistenza di carico sia piccola nei rispetti della resistenza d'uscita, ciò che abitualmente si verifica.

QUESTIONI DI FASE

Ign. - Immaginerete, Curioso, che ho fretta di passare allo studio di realizzazioni pratiche.

Avevo d'altronde, promesso a mio zio Giulio di costruirgli un ricevitore a transistori perfezionato per portarselo a Dakar ove conta

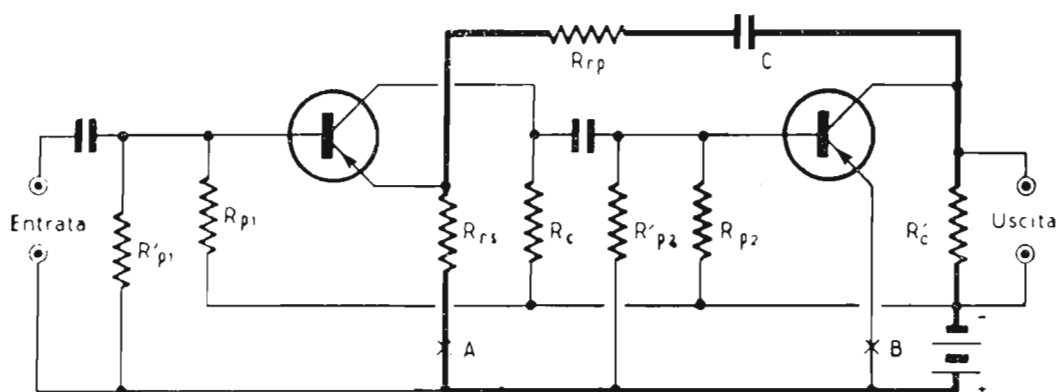



Fig. 61 - Controreazione mista, serie-parallelo, su due stadi di un amplificatore B.F.

di curare al sole i suoi reumatismi. Ho pensato di adottare un amplificatore B.F. a 2 stadi. E' possibile realizzare una controreazione globale su questi due stadi, reinserendo la tensione d'uscita all'entrata?

Cur. - Sì. Però coi transistori, non conviene fare la controreazione su più di due stadi. Poichè a causa delle capacità interne, sulle quali vi ho già intrattenuto a lungo, la fase si sposta sensibilmente in ogni stadio. E con più di due stadi non si sa perciò come si trovi.

Ign. - In altre parole, si rischia di fare della reazione, anzichè della controreazione.

Cur. - Non è affatto impossibile... Ma ecco qui uno schema che vi piacerà. Sono proprio due stadi B.F. a resistenza-capacità. E noi preleviamo la tensione d'uscita per applicarne una frazione, attraverso il condensatore *C* e le resistenze R_{rp} e R_{rs}, all'emettitore del primo transistore.

Ign. - To'. Ma perchè non alla base, come avete fatto per uno stadio?

Cur. - Perchè ogni stadio determina una inversione di fase. Perciò dopo due stadi, ritroviamo la fase delle tensioni applicate all'entrata. Non è perciò possibile reinserire nella base le tensioni d'uscita,

sotto pena di provocare un terribile innesco. Per contro, applicandole all'entrata, noi faremo della buona controreazione. Inoltre, la resistenza R_{rs}, aggiungerà ancora dal canto suo, un effetto di controreazione-serie sul primo stadio.

Ign. - Magnifico. Ecco un circuito che farà la felicità di mio zio.

INCOMINCIA A SCOTTARE

Cur. - Credo di no. Poichè quanto i raggi del sole tropicale saranno benefici per lui, altrettanto saranno nefasti pel ricevitore.

Ign. - Ah! Sì: l'azione della temperatura sui semiconduttori! Occorrerà allora posare una borsa di ghiaccio sul ricevitore? E innanzi tutto, in quale misura l'aumento dell'intensità di corrente dovuto all'elevazione della temperatura, incide sul funzionamento di un ricevitore?

Cur. - Mi ero ripromesso di non ricorrere oggi a curve delle quali mi sembrate abbastanza saturato. Ma, immaginate semplicemente, Ignoto, che la corrente iniziale di collettore raddoppi ogni volta che la temperatura aumenta di 8° C; di modo che quando si passa da 0 a + 40° C, la corrente cresca trentadue volte. Di conseguenza un aumento generale della corrente di collettore, provocata dal riscaldamento dei transistori, sposterà tutte le nostre curve di I_c verso l'alto. Fra 20° e 40° C, la corrente di collettore può facilmente raddoppiare. Ad un tratto, il punto di funzionamento (che è, ve lo ricordo, definito dall'incrocio della retta di carico con uno delle curve corrispondenti a una data tensione o corrente di base) in luogo di trovarsi a metà della retta di carico, si sposterà più o meno verso sinistra, trascinando dalla salita generale delle curve. Ecco finita la nostra bella simmetria! E compromessa la linearità dell'amplificazione!

Ign. - Che disastro! Ne sono atterrito... ma non troppo. Poichè conosco il vostro sistema: voi mi gettate nella più profonda afflizione per mostrarmi poi, come un prestigiatore che cava un coniglio dal suo cilindro, il rimedio che aggiusta tutto. Forza, cavate fuori il vostro coniglio!

Cur. - Voi lo conoscete già. Poichè è ancora la controreazione che risolverà il vostro problema.

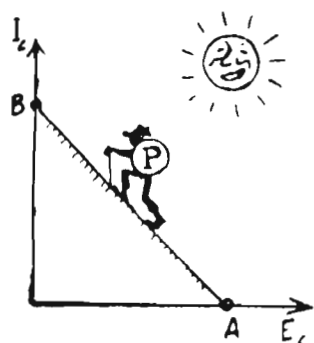
Efficace per combattere le distorsioni, essa lo è altresì per rimediare alle lente fluttuazioni derivanti dalle variazioni di temperatura.

Ign. - Perciò, gli schemi di controreazione che abbiamo esaminato servono nello stesso tempo a compensare gli effetti della temperatura?

Cur. - Sì, in una certa misura, beninteso; e quando agiscano ugualmente in corrente continua (ciò che non è però il caso delle figure 60b e 61). Ma, in generale, occorre a questo scopo una controreazione più energica.

Ign. - Essa sarà allora troppo forte per i nostri segnali da amplificare e ridurrà eccessivamente il guadagno del circuito. Come uscire da questa situazione corneliana a circuito chiuso?

Cur. - Adottando il metodo cartesiano di separazione delle diffi-

coltà e delle funzioni. Lasciamo da parte le resistenze di controreazione che correggono i segnali da amplificare, ed occupiamoci di quelle che compenseranno gli effetti di temperatura. In questo caso potremo utilizzare la controreazione serie...

ANCORA UN « PICCOLO PARTICOLARE »

Ign. - Ma non vedo alcuna differenza con lo schema di controreazione serie per tensione alternativa, a parte la presenza del condensatore *C*.

Cur. - Ed è proprio questo « piccolo particolare » che cambia tutto. Poichè è un condensatore di forte capacità (generalmente di tipo

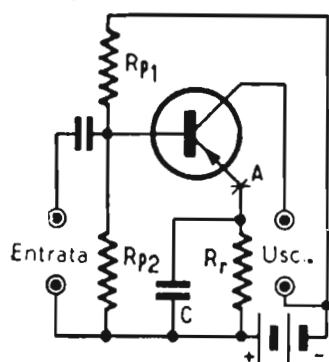



Fig. 62 - Compensazione di temperatura mediante la controreazione serie. La tensione della base è stabilizzata dal divisore di tensione R_{p1} - R_{p2}.

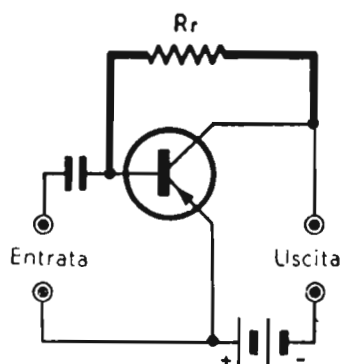



Fig. 63 - Compensazione di temperatura mediante la controreazione parallelo.

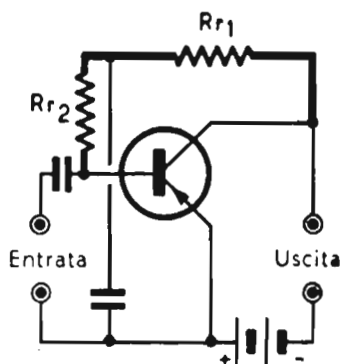



Fig. 64 - Stesso schema della fig. 63, ma con disaccoppiamento della componente alternativa.

elettrolitico), il quale offre alle correnti alternative un'impedenza molto inferiore alla resistenza R_r. Quest'ultima non sarà quindi percorsa dalla componente continua della corrente e non eserciterà quindi su questa l'effetto di controreazione.

Ign. - E' semplice ed ingegnoso come l'uovo di Colombo. Ma come fare se desideriamo avere nello stesso tempo una controreazione in alternata?

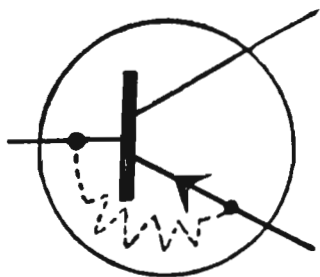
Cur. - Nulla vi impedisce di inserire nel punto *A*, in serie con R_r, un'altra resistenza di controreazione, non però disaccoppiata.

Ign. - Evidentemente. Si può applicare in questo caso, il principio della controreazione-parallelo, di tensione?

Cur. - Certamente. Ma allora si sopprime il condensatore che serviva proprio a non lasciar passare la componente continua. Si applica così alla base una frazione di tensioni continue e alternative del collettore.

Ign. - Ma non riesco a vedere l'altro braccio del divisore di tensione, che serve a questo scopo.

Cur. - E vi è una ragione. Poichè è la resistenza base-emettitore del transistore. Ora, se volete fare il pignolo — e ne avreste ragione di farlo — potreste, mediante un condensatore di disaccoppiamento

C, sopprimere la componente alternativa da una porzione della resistenza di controreazione, realizzandola con due resistenze, R_{r1} e R_{r2} in serie,. (fig. 64).

Ign. - Per ritornare al mio povero zio, se ho ben compreso, potrei compensare gli effetti di temperatura, inserendo delle resistenze nei punti *A* e B (fig. 61).

Cur. - Certamente, alla condizione di disaccoppiare la prima mediante un condensatore di forte capacità, in modo che essa non rinforzi eccessivamente la controreazione... Ma non vi ho ancora parlato di un modo molto elegante per ovviare agli inconvenienti del comportamento dei semiconduttori. Trattasi di metterli a profitto per combatterli.

UTILIZZAZIONE DEI DIFETTI

Ign. - Ma è serio tutto ciò? Si tratta forse di qualcosa del genere dell'omeopatia, ove si guarisce il male mediante il male stesso?

Cur. - E' proprio così che si deve intendere. Poichè il riscalda-

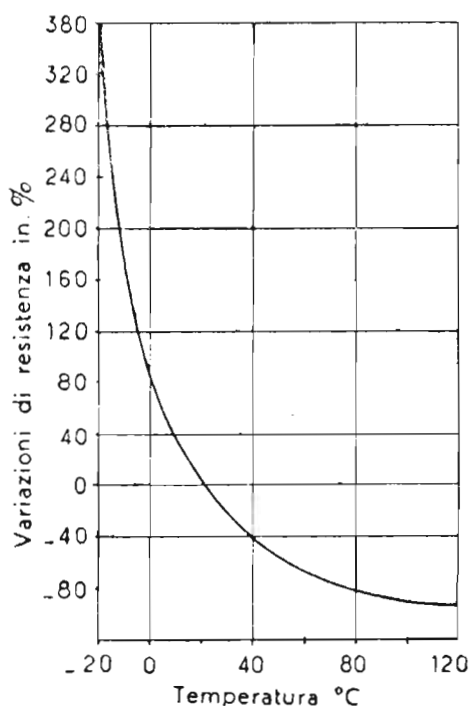



Fig. 65 - Variazione (in %) della resistenza di un termistore in funzione della temperatura, in rapporto al valore della temperatura ambiente di 20° C.

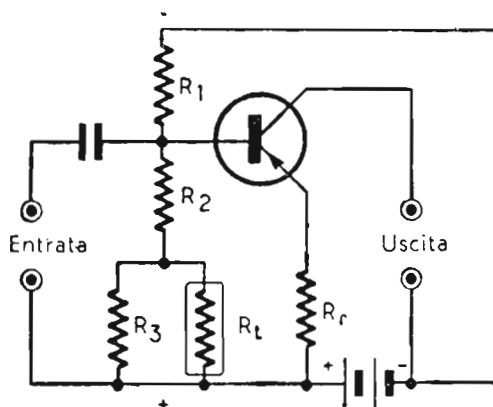
mento aumenta l'intensità della corrente nei semiconduttori, cioè è dovuto alla diminuzione della resistenza con l'aumento della temperatura. Si possono allora fabbricare delle resistenze composte di semiconduttori del tipo *P* o *N*, nelle quali la resistenza cade molto rapidamente con l'aumento della temperatura. Ecco la curva di una di tali resistenze, chiamate « termistori », o resistenze a coefficiente di temperatura negativo (abbrev. C.T.N.). Potete vedere che, quando la temperatura passa da 20° a 40° C, la resistenza del termistore diminuisce quasi del 45%. E a 60° C, essa diminuisce di più della metà.

Ign. - Ecco una resistenza che sopporta male il calore. Mi domando come potete utilizzarla per neutralizzare gli inconvenienti del calore.

Cur. - Semplicemente collocandola nel divisore di tensione che fissa la polarizzazione della base.

Tale divisore (fig. 66) risulterà allora composto dalla resistenza R_2 e del termistore R_t in parallelo a R_3, ed in serie con entrambe, la R_1. Che cosa accade allora quando la temperatura sale?

Ign. - La resistenza del termistore diminuisce, ciò che fa diminuire la resistenza del braccio del divisore R_2 - R_3 - R_t. E poichè la

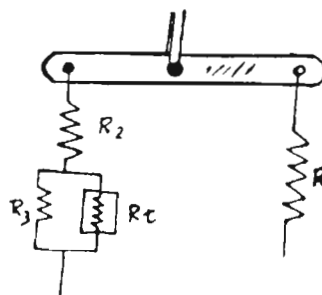
Fig. 66 - Compensazione degli effetti della temperatura mediante l'impiego di un termistore R_t agente sul potenziale della base.

resistenza di R_1 non diminuisce (o fors'anche aumenta leggermente con la temperatura) il potenziale della base diverrà meno negativo. E ciò provocherà una diminuzione di corrente del collettore. Magnifico!

Cur. - Vedete dunque che l'arte suprema nella vita, è di mutare i difetti delle cose (o degli esseri) in qualità. Ciò che noi abbiamo realizzato qui.

Ign. - Ma perchè avete complicato lo schema con le resistenze R_2 e R_3?

Cur. - Perchè la compensazione si possa effettuare con precisione. Occorre che i valori di queste resistenze siano calcolati in modo adeguato. Talvolta si può omettere l'una o l'altra, se la caratteristica del termistore risponde esattamente ai nostri desideri.

Ign. - Sento che la mia resistenza si abbassa, poichè il mio cervello è troppo riscaldato.

Cur. - Allora lasciamolo in riposo.

NONA CONVERSAZIONE

Nel corso delle loro precedenti conversazioni, Curioso e Ignoto, hanno acquisito una solida conoscenza del comportamento dei transistori utilizzati come amplificatori.

Essi hanno, a questo scopo, analizzato il circuito più correntemente usato, ove i segnali da amplificare sono applicati fra base ed emettitore, e raccolti, dopo amplificazione, fra collettore ed emettitore. Ciò corrisponde al circuito classico dei tubi elettronici.

Comunque ed allo stesso titolo per questi ultimi, altri schemi possono essere vantaggiosamente impiegati in certi casi. E' utile esaminarne la struttura ed il funzionamento prima di passare allo studio dei circuiti pratici che i nostri amici intraprenderanno nelle loro prossime conversazioni.

SOMMARIO: Circuiti a tubi elettronici con catodo, o griglia o anodo a massa — Circuiti con transistori ad emettitore comune, a base comune o a collettore comune — Amplificazione in corrente e in tensione dei tre circuiti fondamentali — Loro resistenza d'entrata e d'uscita — Tavola sinottica delle caratteristiche.

EC - BC - CC

IL CASO NELLA STORIA DELLE INVENZIONI

Ignoto. - Come mai il transistore è stato inventato più di quarant'anni dopo il tubo elettronico? Sembra semmai, a prima vista, più semplice introdurre delle impurità in un semiconduttore che praticare il vuoto in un'ampolla di vetro, e riscaldare un catodo proiettante elettroni verso l'anodo, attraverso una griglia.

Curioso. - Nella storia delle invenzioni, il caso giuoca un certo ruolo. Ed il transistore avrebbe potuto essere inventato prima del tubo elettronico. D'altra parte, sperimentando dei rivelatori a cristallo di zincite, un tecnico russo, di nome Lossev, riuscì nel 1922 a generare e ad amplificare delle oscillazioni elettriche.

Il suo circuito (denominato « cristadyne ») è però rimasto senza seguito. Ma se il transistore fosse stato inventato prima della valvola, si sarebbe salutata l'apparizione del tubo a vuoto come un grande perfezionamento... E si sarebbero applicati ai triodi elettronici i diversi schemi fondamentali impiegati per i triodi a cristallo.

Così, si sarebbero trovati i montaggi con catodo a massa, griglia a massa e anodo a massa.

Ign. - Cosa sono queste passeggiate della massa?

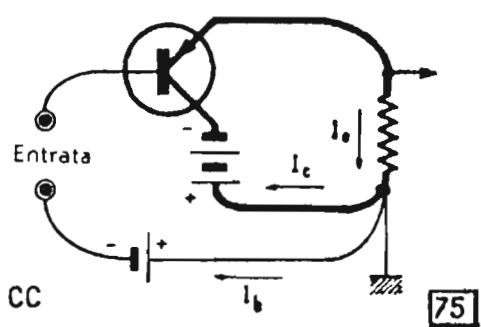
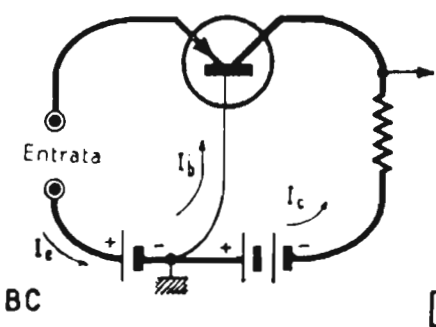
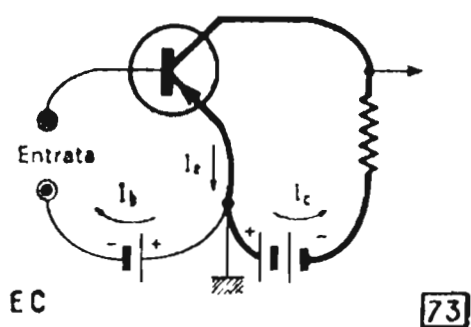
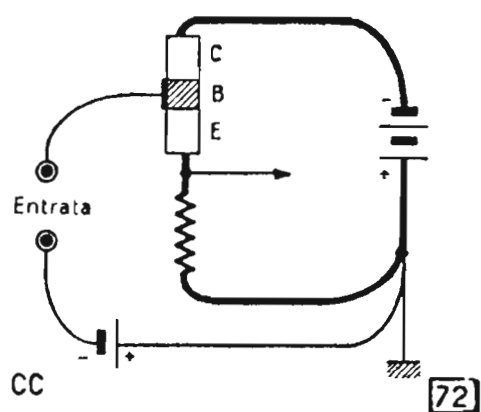
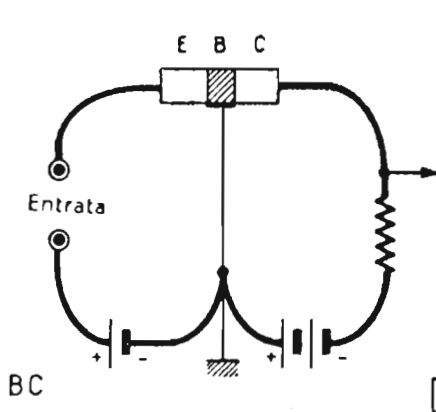
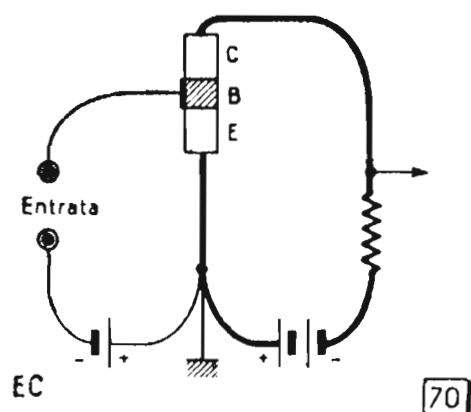
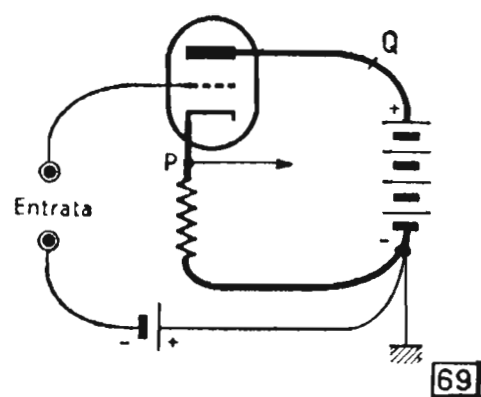
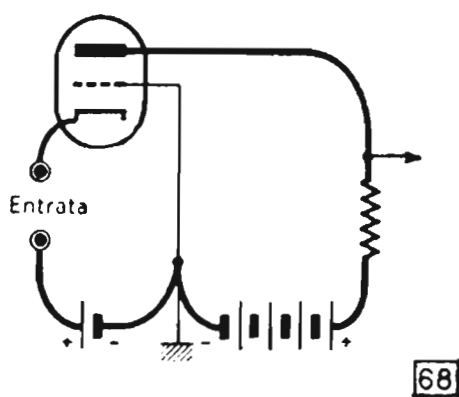
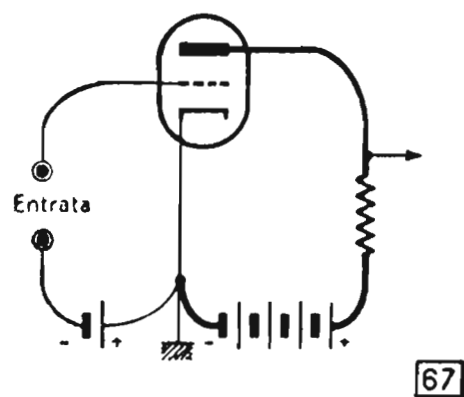



Fig. 67 - Circuito con catodo a massa, il più classico di tutti

Fig. 68 - Circuito con griglia a massa.

Fig. 69 - Circuito con anodo a massa, a « catodina ».

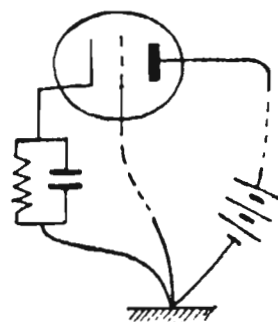
Fig. 70 - Circuito a emettitore comune, il più usato di tutti.

Fig. 71 - Circuito a base comune, il più antico di tutti.

Fig. 72 - Circuito a collettore comune.

Fig. 73-74-75 - I tre circuiti fondamentali a transistori, rappresentati in modo di porre in evidenza come, al punto comune, la corrente dell'emettitore I_e, si divide in due: la corrente di base I_b e la corrente di collettore I_c.

I TRE CIRCUITI FONDAMENTALI PER I TUBI

Cur. - Voi sapete, Ignoto, che per « massa » noi intendiamo il punto a potenziale fisso. In uno schema a valvole, è il punto ove convergono i circuiti di griglia e di anodo.

Ign. - Mi sembra che sia sempre verso il catodo che fanno capo i ritorni di questi due circuiti.

Cur. - E' il caso dello schema più diffuso, che viene indicato col nome di « catodo a massa » (anche se fra catodo e massa si trova una resistenza di polarizzazione, poichè questa, per le tensioni alternative, è praticamente cortocircuitata da un condensatore). Avete forse dimenticato il circuito con griglia a massa?

Ign. - Effettivamente noi l'abbiamo incontrato quando studiavamo la modulazione di frequenza. Impiegato per l'amplificazione dei segnali a frequenze elevate, esso permette di separare meglio il circuito d'entrata da quello d'uscita, poichè la griglia funge da schermo di protezione. Ed è il catodo che serve qui, come elettrodo di comando.

Cur. - Rimane ancora una terza possibilità: fissare il potenziale dell'anodo, collegandolo a massa (attraverso la sorgente di alta tensione beninteso), applicare il segnale d'entrata fra griglia e massa, e raccogliere la tensione amplificata su una resistenza di carico inserita fra catodo e massa.

Ign. - Che circuito curioso! Certo, anche qui, la resistenza di carico è percorsa dalla corrente anodica, in modo che vi si ritroverà bene la tensione amplificata.

Cur. - Ho avuto torto di usare quest'ultimo termine. Infatti, il guadagno del nostro circuito, chiamato « *trasferitore catodico* » o « *catodyne* », è inferiore all'unità. Perchè la resistenza di carico esplica un effetto di controreazione, tale che invece di un'amplificazione si ha piuttosto una deamplificazione.

Ign. - E' allora un circuito senza alcun interesse?

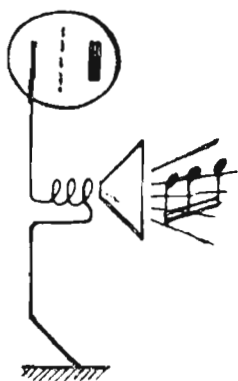
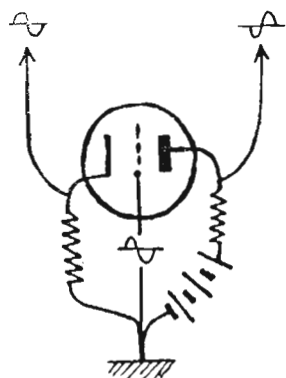
Cur. - Ma al contrario. Dovete notare anzitutto, Ignoto, che le tensioni che appaiono sulla resistenza di carico, al punto *P*, sono in fase con quelle applicate alla griglia.

Ign. - E' anche per questo motivo che si ha questa violenta controreazione.

Cur. - Sicuro. Ma se voi inserite una seconda resistenza di carico nel punto *Q*, cioè secondo il modo classico di uno schema con catodo a massa...

Ign. - ... avrei in questo punto delle tensioni in opposizione di fase con quelle d'entrata. Pertanto lo stesso tubo permette di ottenere all'uscita delle tensioni in fase ed in opposizione di fase! Che circuito pratico per eccitare due tubi in push-pull !

Cur. - E' uno degli impieghi del « catodyne ». Ma viene ugualmente usato nel caso in cui occorre una bassa resistenza d'uscita. Poichè è evidente che la resistenza posta nel catodo deve avere un valore molto inferiore a quello impiegato nel circuito anodico. Si può anche, tra l'altro, alimentare direttamente mediante una valvola di uscita, la bobina mobile di un altoparlante, senza passare attraverso il trasformatore di adattamento dell'impedenza, eliminando così una causa non trascurabile di distorsioni.

Ign. - Eccomi definitivamente conquistato dal vostro catodyne! Ma vi conosco e vi vedo già sfoderare le vostre ambiguità, Curioso. Se avete accennato con tanto calore ai tre circuiti fondamentali a tubi, è senza dubbio per analizzare degli schemi equivalenti a transistori.

VERSIONE TRANSISTORI

Cur. - Non vi si può proprio nascondere nulla. Effettivamente a ciascuno di questi tre circuiti, corrisponde un modo particolare di utilizzazione dei transistori. Per maggior chiarezza, vi traccio gli schemi corrispondenti a due modi.

Da un lato, rappresenterò il transistore con un bastoncino, come abbiamo fatto all'inizio; si vede così, meglio il cammino della corrente entro le tre regioni del transistore, e mi dispiace talvolta che non si sia adottato questo simbolo universalmente.

Da un altro lato, traccerò gli stessi schemi col simbolo abituale. Ma piuttosto che curare l'estetica dello schema, tracciando delle linee orizzontali e verticali, mi sforzerò di mettere bene in evidenza i circuiti di base e di collettore. Ed ancora per maggior chiarezza ho posto in evidenza in tratto pieno i circuiti anodici dei tubi ed i circuiti di collettore dei transistori.

Ign. - I vostri schemi non rassomigliano infatti a tutto ciò che ho visto sinora. Vedo che vi compaiono ancora, tre possibilità: emettitore a massa, base a massa e collettore a massa.

Cur. - Effettivamente. Ma essendo facoltativa la presenza della massa, questi tre schemi vengono denominati.: *circuito ad emettitore comune, circuito a base comune e circuito a collettore comune.*

Ign. - Il fatto è, che in ciascuno di questi schemi, è una di queste tre zone del transistore che è comune ai circuiti d'entrata e di uscita... Francamente, non immaginavo che esaminando con voi il circuito ad emettitore comune, questo venisse chiamato proprio così.

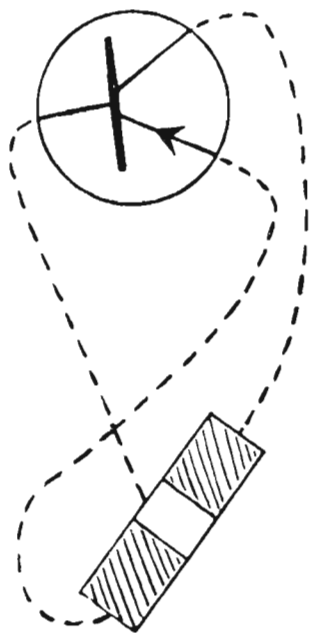
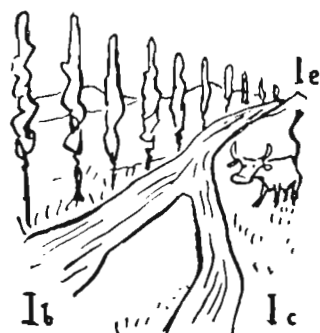
Cur. - Ci siamo effettivamente intrattenuti a lungo su questo circuito, perchè esso è di gran lunga il più impiegato.

Ign. - Esattamente come è per i tubi, il classico schema a catodo comune.

Cur. - Proprio così. E voi già sapete che questo schema correttamente impiegato può procurare un guadagno eccellente sia in corrente che in tensione e per conseguenza anche in potenza. Vi ricordo che la tensione d'uscita in questo circuito a emettitore comune (*E.C.*), si trova in opposizione di fase nei rispetti di quello d'entrata e che la resistenza d'entrata è di qualche centinaio di ohm, mentre la resistenza d'uscita è di qualche decina di kiloohm.

MA E' UN AMPLIFICATORE ?

Ign. - Tutto ciò è ben impresso nella mia memoria. Posso ora avventurarmi nel regno delle incognite, tentando di analizzare il circuito a base comune (o come suppongo, *B.C.*, in sigla abbreviata)? In questo caso le tensioni d'entrata sono ancora applicate fra emettitore e base. Ma questa volta è l'emettitore che giuoca il ruolo di elettrodo di controllo, poichè la base rimane passiva. Se il segnale d'entrata rende l'emettitore più positivo, la corrente di base aumenta, come pure quella del collettore; allora la caduta di tensione lungo la resistenza di carico aumenta a sua volta ed il potenziale d'uscita diviene più positivo. Senza alcun dubbio la tensione d'uscita è qui, in fase con quella d'entrata.

Cur. - Le vostre considerazioni sono correttissime, ma incomplete. Poichè non avete esaminato quale sia in questo caso, l'amplificazione di corrente.

Ign. - Infatti vi è qualcosa che mi turba. Nel circuito d'entrata ho la corrente dell'emettitore I_e, mentre nel circuito d'uscita non ho che la corrente di collettore I_c, che è leggermente inferiore perchè la corrente dell'emettitore si divide (e ciò appare chiaramente nello schema) in due correnti: quella di base I_b e quella di collettore I_c. E ciò che è vero per le correnti, lo è anche per le loro piccole variazioni. Di conseguenza l'amplificazione di corrente, cioè il rapporto fra una piccola variazione di corrente d'entrata ΔI_e, sarà inferiore all'unità poichè I_e è più grande di I_c. Piuttosto che di guadagno si può parlare di attenuazione (1).

Cur. - Sì. Lo si indica con la lettera α, mentre per il circuito a emettitore comune l'amplificazione di corrente viene indicata con la lettera β.

Ign. - Non mi sembra logico affibbiare la prima lettera dell'alfabeto greco ad un circuito che è meno impiegato.

Cur. - Per questo, vi è una ragione storica. All'inizio dei transistori non si conosceva che il tipo a punte. Ed unicamente il circuito a base comune permetteva di utilizzarlo in modo stabile. E' dunque il primo in ordine di data e per questo motivo, i costruttori indicano sovente le caratteristiche per questo tipo (ormai abbandonato) d'impiego dei triodi a cristallo.

Ign. - Insomma, astrazione fatta del devoto rispetto dovuto alle cose antiche, il circuito a base comune non offre alcun interesse, poichè in luogo di amplificare, esso attenua.

MIGLIORE DI UNA CURIOSITA' STORICA

Cur. - Ecco il pericolo delle conclusioni definitive senza riflettere, che caratterizzano la nuova generazione!... Lo schema *B.C.* è in moltissima casi, estremamente interessante. Esso permette di raggiunge-

---

(1) Si può facilmente esprimere questo « guadagno » che si indica con α, tenendo presente che:

$$\alpha = \frac{\Delta I_e}{\Delta I_e} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_c + \Delta I_b}$$

poichè $\Delta I_e = \Delta I_c + \Delta I_b$

Dividendo il numeratore ed il denominatore per ΔI_b si ha:

$$\alpha = \frac{\Delta I_c / \Delta I_b}{\Delta I_c / \Delta I_b + 1}$$

Si vede che α è inferiore all'unità. D'altra parte $\Delta I_c / \Delta I_b$ è, lo si ricordi, l'amplificatore di corrente nel circuito a emettitore comune che indichiamo con β.

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

Per i transistori aventi un coefficiente β di valore elevato, α si approssima sensibilmente all'unità; in altre parole, la corrente all'uscita subisce sensibilmente le stesse variazioni che all'entrata.

re frequenze più elevate che non con gli altri schemi. Ed inoltre è capace di assicurare una eccellente amplificazione.

Ign. - State prendendomi in giro? Voi chiamate amplificazione un guadagno inferiore all'unità?

Cur. - Si tratta in questo caso del guadagno in intensità. Ma ciò che vi può ancor interessare, secondo i casi, è il guadagno in tensione e soprattutto in potenza. Ora, da questo lato, la situazione è più soddisfacente. Al fine di rendervene conto voi stesso, occorre dirvi che la resistenza d'entrata dello schema *B.C.* è molto bassa; secondo i tipi, essa varia da 30 a 500 Ω.

Ign. - Nulla di strano, poichè è il rapporto fra una piccola variazione di tensione all'entrata e la variazione di corrente che essa provoca. In questo caso è in giuoco la corrente dell'emettitore. Ed essa varia fortemente. Quindi il rapporto ha un valore molto basso.

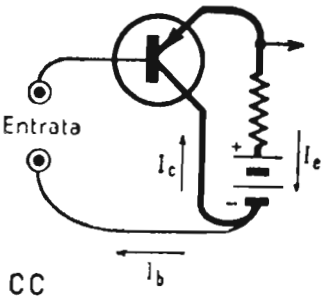



Fig. 76 - Variante possibile del circuito a collettore comune, che differisce da quella della fig. 75 solo per la posizione della sorgente di tensione del collettore.

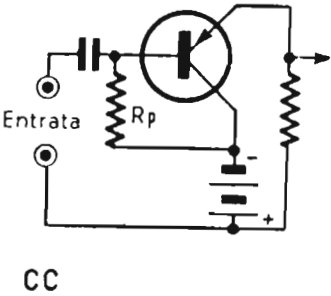



Fig. 77 - Sistema di polarizzazione del circuito di fig. 75.

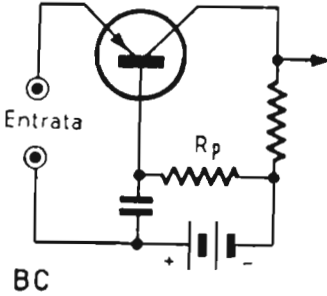



Fig. 78 - Sistema di polarizzazione del circuito di fig. 74.

Cur. - Ben ragionato. Per contro la resistenza d'uscita può assumere dei valori molto elevati, dell'ordine del megohm.

Ign. - Corbezzoli! Capisco allora, che una variazione di corrente d'uscita, sensibilmente la stessa di quella della corrente d'entrata, deve, su una tale resistenza d'uscita così elevata, far apparire delle tensioni molto maggiori di quelle che appaiono all'entrata. Noi dobbiamo quindi avere effettivamente un guadagno in tensione piuttosto elevato.

Cur. - Certamente. Esso può essere di parecchie migliaia di volte. E per questo motivo è possibile parimenti ottenere un ottimo guadagno in potenza. Disgraziatamente, non se ne può approfittare convenientemente.

Ign. - Mi sottoponete ad una vera doccia scozzese, Curioso. Lo schema *B.C.* si è appena riabilitato nella mia opinione, che voi vi mettete a denigrarlo. Perchè?

Cur. - Perchè il nostro stadio *B.C.* può essere seguito da altri stadi, la cui impedenza d'entrata, molto più bassa di quella d'uscita del *B.C.*, vi farà perdere il beneficio del guadagno ottenuto grazie alla resistenza d'uscita elevata.

IL TERZO CIRCUITO

Ign. - Questa volta è proprio finito! Non voglio più sentire parlare di questo dannato circuito a base comune. Spero che il circuito a collettore comune (senza alcun dubbio indicato dalle iniziali *C.C.*) sarà meno deludente.

Cur. - Prima di iniziare l'esame, vi farò rilevare che ne esistono due varianti, a seconda che la batteria di tensione del collettore è posta fra massa e collettore, ovvero fra resistenza di carico e massa. Ciò è praticamente la stessa cosa. Ma nella seconda variante, la base è automaticamente polarizzata nei rispetti dell'emettitore.

Ign. - Ma allora, nella prima variante occorre una pila speciale per la polarizzazione?

Cur. - Assolutamente no. Una semplice resistenza di polarizzazione R_p, posta fra la base ed il negativo della pila, serve perfettamente allo scopo, come abbiamo anche fatto nel caso del circuito *E.C.* Pertanto vi dò subito lo schema pratico della polarizzazione nel caso di *B.C.*

Ign. - Preferisco di gran lunga questo, che le due batterie che figurano nei nostri schemi teorici a tutto vantaggio dei fabbricanti di pile... Ma ritorniamo al nostro circuito *C.C.* Qui, vedo che non vi è affatto inversione di fase all'uscita. E' facile notare che un potenziale più negativo sulla base accresce l'intensità della corrente dell'emettitore, che determina una caduta di tensione più forte, rendendo l'emettitore meno positivo, e quindi più negativo.

Cur. - Proprio così, Ignoto. Il circuito *E.C.* è il solo dei nostri tre montaggi che è capace d'invertire la fase dei segnali. Vediamo ora che ne è dell'amplificazione di corrente.

Ign. - All'entrata abbiamo la corrente di base che è sempre molto debole. Per contro, all'uscita abbiamo la più forte delle nostre correnti, quella dell'emettitore. Per conseguenza noi dovremo avere qui un'amplificazione di corrente ancora più forte che nel circuito *E.C.* Vedreste qualche difficoltà se, continuando a pescare nell'alfabeto greco, la chiamassi γ (gamma)? (1).

Cur. - Non penso che i greci vi si oppongano. Ed eccovi ansioso di conoscere questo circuito che amplifica così bene. Devo versare dell'acqua fredda sul vostro entusiasmo giovanile?

Ign. - Sento già che voi mi state portando un colpo crudele annunciandomi che qui le resistenze interne sono tali che, all'opposto

(1) L'amplificazione di corrente in *C.C.* è:

$$\gamma = \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c + \Delta I_b}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} + \frac{\Delta I_b}{\Delta I_b} = \beta + 1$$

Si vede che nel *C.C.* il guadagno è leggermente maggiore che nel circuito *E.C.*

Fra le espressioni del guadagno di questi tre circuiti fondamentali, si può stabilire una relazione molto semplice:

$$\alpha \times \gamma = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e} \times \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \beta$$

di ciò che accade nel circuito *B.C.* la nostra bella amplificazione di corrente non serve a nulla.

Cur. - Non vi nascondo che è proprio la triste verità. Qui, analogamente al circuito catodyne, del quale è la versione in transistori, la resistenza d'entrata può raggiungere 1 MΩ, mentre quella d'uscita è molto bassa: fra 50 e 500 Ω.

Ign. - Tutto l'opposto di *B.C.!* Di modo che non vi sarà alcun guadagno nè in tensione, nè in potenza?

Cur. - Nulla o quasi nulla, Ignoto. Voi avreste potuto d'altronde, rendervene conto, notando che la resistenza di carico introduce qui una forte controreazione. Quando un'alternanza del segnale tende a rendere la base più negativa nei rispetti dell'emettitore, aumentando la corrente di quest'ultimo, quest'aumento di corrente rende l'emettitore più negativo, ciò che si oppone all'azione del segnale d'entrata.

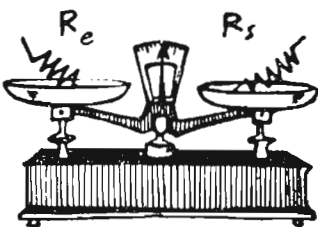
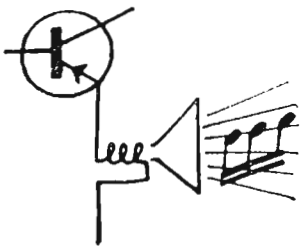
Ign. - A che serve allora questo circuito, incapace di procurare un guadagno così poco interessante, in tensione?

Cur. - Lo si impiega in certi casi, quando occorre una corrente per eccitare un transistore di potenza ovvero quando una bassa resistenza d'uscita permette di ottenere un miglior adattamento d'impedenza, come per esempio, il collegamento diretto con la bobina mobile di un altoparlante.

Ign. - Constato che una volta di più si avvera la vecchia massima « in medio stat virtus ».

Nei transistori, questo giusto medio è evidentemente il circuito a emettitore comune, ove le resistenze d'entrata e d'uscita hanno dei buoni valori medi, ciò che permette di ottenere dei guadagni convenienti, sia in intensità che in tensione ed in potenza.

Cur. - Avete ragione, Ignoto. I valori delle resistenze d'entrata e d'uscita sono come i due piatti di una bilancia. Sensibilmente allo stesso livello in *E.C.*, il piatto R_e si abbassa molto in *B.C.*, e sale in *C.C.*, nei rispetti del piatto R_s. E se voi mi promettete di non dirlo a nessuno, vi confido un segreto: per un dato transistore il prodotto $R_e \times R_s$ della resistenza d'entrata per la resistenza d'uscita, rimane il medesimo per i tre circuiti fondamentali.

Ign. - Così, per esempio, se in *E.C.* si ha $R_e = 20.000\ \Omega$, il prodotto è 10.000.000. Lo stesso transistore in circuito *B.C.* avrà, diciamo, $R_e = 50\ \Omega$; in questo caso, per avere il prodotto costante, occorre che $R_s = 200.000\ \Omega$. E se in *C.C.* è R_e che è di 200.000 ohm, R_s dovrà avere 50 Ω. Se permettete cercherò di riassumere in una tabella le principali caratteristiche dei vostri tre circuiti, in modo da poterli meglio confrontare.

CIRCUITO	E.C.	B.C.	C.C.
E.C.	β	$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\beta = \gamma - 1$
B.C.	$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$	α	$\alpha = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$
C.C.	$\gamma = 1 + \beta$	$\gamma = \frac{1}{1-\alpha}$	γ

Cur. - Eccellente idea che vi permetterà di mettere la parola fine alla nostra interessantissima conversazione odierna (2).

---

(2) Nella nota precedente abbiamo stabilito una relazione molto semplice fra i coefficienti di amplificazione di corrente nei tre circuiti fondamentali:

$$\beta = \alpha \times \gamma \text{ o } \alpha = \frac{\beta}{\gamma}$$

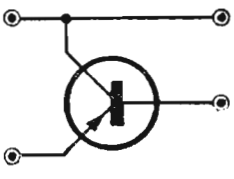
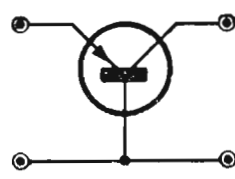
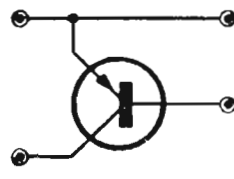
La tabella di pag. 89 permette di esprimere ciascuno di questi coefficienti, in funzione di ciascuno degli altri due.

CIRCUITO	emittente comune	base comune	collettore comune
Schema			
Resistenza d'entrata R_e	$\Delta E_b/\Delta I_b$ 200 a 2000 Ω	$\Delta E_e/\Delta I_e$ 30 a 1500 Ω	$\Delta E_b/\Delta I_b$ 0,2 a 1 MΩ
Resistenza d'uscita R_s	$\Delta E_c/I_c$ 10 a 100 kΩ	$\Delta E_c/\Delta I_c$ 0,5 a 2 MΩ	$\Delta E_e/\Delta I_c$ 50 a 500 Ω
Amplificazione di corrente	$\beta = \Delta I_c/\Delta I_b$ da 20 a 200	$\alpha = \Delta I_c/\Delta I_e$ meno di 1	$\gamma = \Delta I_e/\Delta I_b$ da 20 a 200
Amplificazione di tensione	alcune centinaia	alcune centinaia o migliaia	circa 1
Amplificazione di potenza	alcune migliaia	alcune centinaia	alcune decine
Fase della tensione di uscita nei rispetti della tensione d'entrata	Opposizione	In fase	In fase
Utilizzazione	Universale Amplificatore e sfasatore	In R.F. Per eccitare una impedenza elevata	Per eccitare una bassa impedenza

Fig. 79 - Tabella riassumente le principali caratteristiche dei tre circuiti fondamentali dei transistori.

DUE LETTERE

Altrettanto (e forse più) che nel campo dei tubi elettronici, il problema dell'adattamento delle impedenze, giuoca un ruolo principale nel progetto dei circuiti a transistori.
Però Ignoto, stenta un po' a capire questa circostanza, a causa dell'insufficienza delle nozioni basilari di elettrotecnica. Perciò Curioso si vede costretto a rimediarvi spiegando al suo amico tali nozioni elementari che, tutto considerato, anche molti tecnici sembrano di non averle completamente assimilate...
(Beninteso, il lettore che è pienamente al corrente dei problemi d'adattamento di impedenze, sarà senz'altro dispensato dalla lettura degli scambi epistolari dei nostri amici).

SOMMARIO: La sorgente e l'utilizzazione — Forza elettromotrice e resistenza interna — Tensione ai morsetti — Controllo per tensione — Controllo per corrente — Condizioni di perfetto trasferimento di potenza — Adattamento delle impedenze — Impiego del trasformatore — Rapporto di trasformazione ottimo.

QUESTIONI DI ADATTAMENTO

IGNOTO SCRIVE A CURIOSO

Mio caro Curioso,

Se questa noiosa influenza mi priva del piacere di incontrarvi, essa tuttavia non mi impedisce di riflettere su tutto ciò che mi avete spiegato nel corso della nostra ultima conversazione.

Ho così potuto constatare che voi attribuite una grande importanza alla questione delle resistenze d'entrata e d'uscita.

I loro valori cambiano a seconda degli schemi adottati. E voi avete in diverse riprese insistito sul problema dell'adattamento (?) delle resistenze.

Vi confesso di non aver ben compreso questa parte della vostra spiegazione. Mi sembra di comportarmi come un semiconduttore del tipo P: *ho delle lacune! Potreste colmarmele?*

Vi ringrazio aticipatamente.

Vostro amico
Ignoto

CURIOSO RISPONDE A IGNOTO

Mio povero Ignoto,

Quanti guai in una volta! L'influenza e le lacune... Il vostro medico si occuperà della prima. Dal canto mio mi sforzerò di far sparire le seconde.

Sì, il problema dell'adattamento delle resistenze (o più generalmente delle impedenze) è molto importante e vorrei che lo assimilaste bene.

In tutti i circuiti che noi dobbiamo esaminare, si tratta di trasferire l'energia elettrica da un organo ad un altro, col minimo di perdite e di dissipazioni. In altre parole col massimo d'effi-

cienza. Vi è sempre pertanto, un organo di partenza ed un organo d'arrivo. Il primo è, nei rispetti del secondo la *sorgente* d'energia. E nei rispetti di questa sorgente, il secondo organo al quale essa fornisce la sua energia, rappresenta *l'utilizzazione*. Insomma, fornitore ed acquirente.

Vogliate scusarmi tanto, Ignoto, di sfoderarvi delle verità elementari, sotto l'aspetto di concetti filosofici. In effetti, voi avete sempre a che fare con queste sorgenti e con questi organi d'utilizzazione. La pila della lampada tascabile è una sorgente ed il filamento della lampadina ch'essa alimenta è la utilizzazione. Gli alternatori d'una centrale sono la sorgente e tutti i motori, tutti gli apparecchi di illuminazione e di riscaldamento collegati alla rete di distribuzione sono l'utilizzazione.

Ma anche il circuito d'antenna di un ricevitore è una sorgente ed il circuito d'entrata di un tubo amplificatore in alta frequenza, ne è l'utilizzazione. Parimenti, il tubo di potenza è la sorgente, e l'altoparlante, l'utilizzazione.

Nel caso dei circuiti a transistori, la uscita di ciascun transistore costituisce analogamente la sorgente, verso l'entrata allo stadio seguente, che ne è l'utilizzazione.

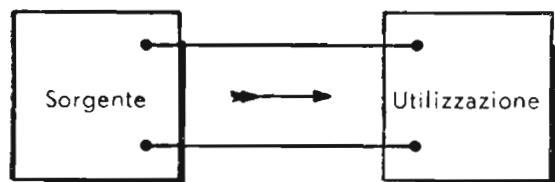



Fig. 80 - Ecco come, sotto l'aspetto più generale, si presenta il problema del trasferimento d'energia della sorgente verso l'utilizzazione.

Ma, a che scopo, moltiplicare gli esempi?

Per contro, ciò che occorre ben comprendere, è che una sorgente è caratterizzata da due grandezze:

1) *La sua forza elettromotrice.*

E' la tensione massima ch'esso è in grado di far apparire ai suoi capi; è, se volete, la sua vitalità...

La si trova ai capi della sorgente quando quest'ultima non eroga alcuna corrente.

2) *La sua resistenza interna.*

Poichè ogni sorgente oppone, al passaggio della corrente che la percorre essa stessa, una certa resistenza, o più in generale, una certa *impedenza della sorgente.*

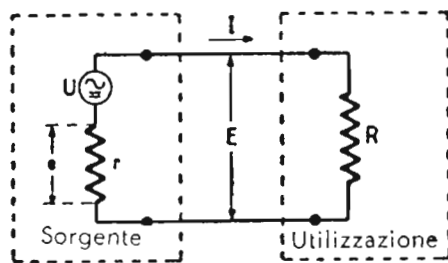



Fig. 81 - La forza elettromotrice U, continua o alternativa della sorgente crea una corrente I attraverso la sua resistenza interna r (sulla quale si produce una caduta di tensione e) e la resistenza di utilizzazione R (sulla quale appare la tensione E).

In questa resistenza interna r, la corrente erogata dalla sorgente determina, beninteso, una caduta di tensione che va a detrimento della tensione E manifestatasi ai capi della sorgente e che è applicata alla resistenza d'utilizzazione R.

Così, la tensione E resterà inferiore alla forza elettromotrice U, e questo, tanto più quanto più forte sarà la corrente I. Evidentemente se non vi sarà alcuna corrente, si troverà ai capi della sorgente una tensione uguale alla forza elettromotrice.

Si dice allora che la sorgente è a *circuito aperto*, ovvero che l'utilizzazione ha una resistenza infinita.

A rischio di far salire la vostra febbre, vi propogno di esaminare questi tre elementi di calcolo. La resistenza totale del circuito è $r + R$. Ne consegue, secondo la legge di Ohm, che l'intensità di corrente è:

$$I = \frac{U}{r + R}$$

Lungo la resistenza interna r questa corrente provoca una caduta di tensione:

$$e = \frac{Ur}{r + R}$$

E nella resistenza d'utilizzazione R, la caduta di tensione è:

$$E = \frac{UR}{r + R}$$

Se avete la forza di usare una matita, sommate ora queste due tensioni e troverete che:

$$e + E = U$$

ciò che ci aspettavamo.

Vedete infatti che la forza elettromotrice si divide in due tensioni: e che è la caduta di tensione interna, ed E che è la tensione applicata all'utilizzazione, cioè quella che appare ai capi della sorgente.

Tale spartizione si manifesta proporzionalmente ai valori delle resistenze della sorgente e dell'utilizzazione.

Se la resistenza interna della sorgente è molto piccola nei rispetti di quella dell'utilizzazione, la caduta di tensione che si manifesta all'interno, è essa pure molto piccola. E la tensione ai capi E sarà praticamente dello stesso valore della forza elettromotrice U.

In queste condizioni, una forza elettromotrice variabile si manifesta sulla resistenza d'utilizzazione, per una tensione variabile; siamo allora in presenza di un *comando per tensione*.

Prendete ora il caso opposto: la resistenza interna r della sorgente è molto più elevata di quella dell'utilizzazione. La caduta di tensione che si produce all'interno della sorgente è allora considerevole.

E la tensione E che rimane disponibile ai suoi capi, e che viene applicata alla resistenza d'utilizzazione, è molto minore della forza elettromotrice U. Ma ciò che conta, in questo caso, è il fatto che l'intensità I della corrente, varia proporzionalmente a U, non dipendendo affatto dal valore di R. Si dice allora che si ha un *comando per corrente*.

Coi transistori ci si può anche trovare in presenza di entrambi questi casi estremi.

Ma in generale, occorrerà preferire una giusta via di mezzo.

Nei circuiti con tubi elettronici, noi cerchiamo di applicare all'entrata di ogni stadio, il massimo di tensione. E qui, il Buon Dio arrangia le cose molto bene. Perchè l'entrata griglia-catodo di un tubo presenta generalmente un'impedenza infinita. Così tutta la forza elettromotrice vi si trova applicata. E' il caso tipico di comando per tensione.

Ma, mio caro Ignoto, coi transistori, le cose cambiano d'aspetto: non è più una semplice tensione, ma *una potenza* che occorre fornire al circuito d'entrata, poichè qualsivoglia sia il circuito, una corrente vi apparirà.

Volgarmente parlando, i tubi si accontentano di *volt*. Ma i transistori ai quali si applicano dei *volt*, assorbono nello stesso tempo degli *ampere*. Ora *volt* per *ampere*, sono dei *watt*.

Ed il problema del trasferimento di potenza non è così semplice. Giudicatene voi stesso.

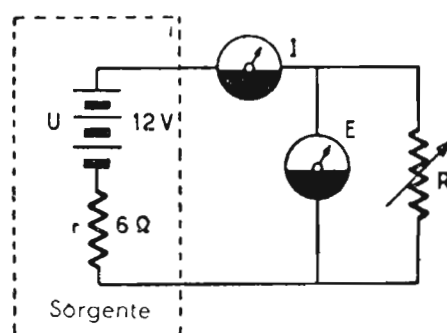



Fig. 82 - Circuito sperimentale per il rilievo delle curve della fig. 83. La resistenza interna r della sorgente è rappresentata separatamente dal simbolo della batteria. Per non introdurre delle perturbazioni nelle correnti e tensioni, occorre usare un amperometro I di bassissima resistenza ed un voltmetro E di elevatissima resistenza.

Noi cerchiamo di fornire all'organo d'utilizzazione il massimo di potenza, cioè la maggior intensità sotto la tensione più elevata.

Volete che studiamo quale dev'essere la resistenza di utilizzazione che dìa il miglior risultato? Se essa è piccola nei

rispetti di quella della sorgente, l'intensità di corrente sarà più grande. Tanto meglio! Ma la tensione su questa resistenza d'utilizzazione sarà più piccola, a causa della caduta di tensione elevata nell'interno della sorgente.

Tanto peggio!

Facciamo allora il contrario. Prendiamo una resistenza d'utilizzazione molto più elevata di quella della sorgente.

Allora (come nel caso dei tubi), noi avremo quasi tutta la forza elettromotrice sull'utilizzazione. Tanto meglio! Ma l'intensità sarà esigua. Tanto peggio! Voi indovinate Ignoto, che ancor

delle variazioni della resistenza di utilizzazione R.

Potrete constatare che, di mano in mano che R aumenta, I diminuisce ed E cresce.

Il loro prodotto P raggiunge rapidamente il massimo per $R = r = 6\ \Omega$, poi decresce lentamente. Non è convincente?

Non dovete però credere che le considerazioni di massimo trasferimento di energia, impongano sempre l'adattamento perfetto delle impedenze. Altre esigenze, come quelle di una buona linearità, possono condurre ad una scelta di

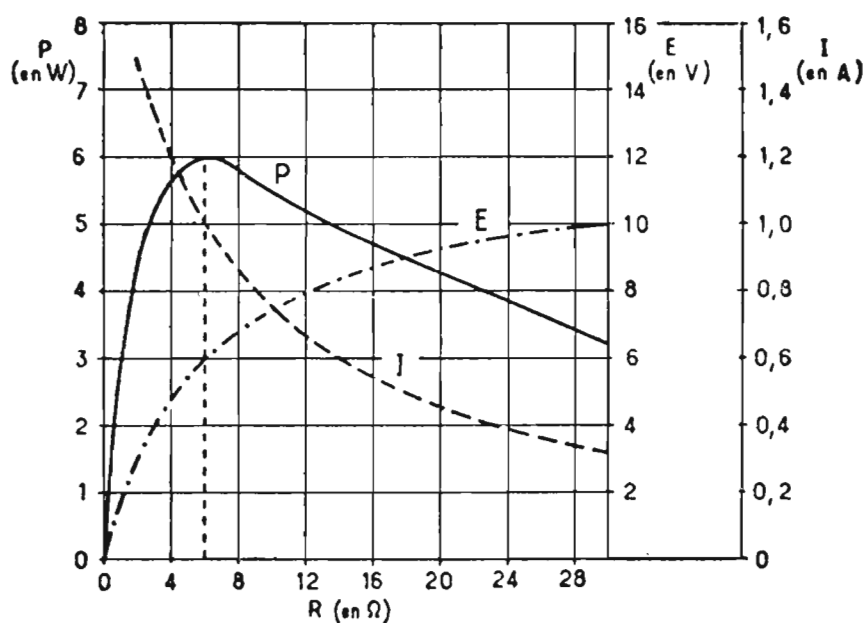



Fig. 83 - Curve di potenza P trasmessa alla resistenza R, di tensione E applicata ai suoi capi, e di corrente I che la attraversa, in funzione del valore della stessa resistenza R. Si noti che le scale di P, di E e di I sono differenti.

qui, la soluzione va ricercata nella nostra « via di mezzo »: resistenza d'utilizzazione non maggiore, nè minore di quella della sorgente.

In altre parole, il miglior *trasferimento dell'energia, si verifica quando la resistenza di utilizzazione è uguale a quella della sorgente.*

Quando questa condizione è realizzata, si suol dire che le resistenze (od in generale, le impedenze), sono adattate.

Per meglio convincersene, mi son dato la pena di tracciare i grafici di variazione della potenza trasmessa P, della intensità di corrente I e della tensione ai capi E, per una sorgente di forza elettromotrice $U = 12$ V, avente una resistenza interna r di $6\ \Omega$, in funzione

valori diversi da quelli di un perfetto adattamento.

Ma già sento spuntare nella vostra mente una domanda spontanea: come far collaborare due organi le cui impedenze sono molto differenti, senza sprecare troppa energia?

Infatti, come eccitare un transistore a resistenza d'entrata piccola, con un altro a resistenza d'uscita elevata?

Come trasferire la potenza di un tubo elettronico di elevata resistenza interna nella bobina mobile di un altoparlante? Come eccitare un tubo amplificatore con resistenza d'entrata infinita con un « pick-up » elettrodinamico di bassa impedenza?

Voi indovinate la risposta: è una no-

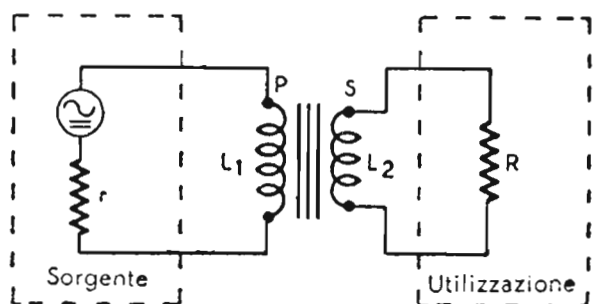



Fig. 84 - Per adattare le impedenze differenti, della sorgente e dell'utilizzazione, si impiega un trasformatore di appropriato rapporto.

stra vecchia conoscenza, il trasformatore, che servirà da *adattatore d'impedenza.* E, beninteso, si giuoca, a questo fine, sul rapporto spire fra primario e secondario. Occorre evidentemente, che l'impedenza del primario sia adattata, quindi uguale a quella della sorgente. E l'impedenza del secondario dovrà essere uguale a quella dell'utilizzazione. In pratica sarà sufficiente che esse ne siano proporzionali.

Ora, voi lo sapete, l'impedenza di un avvolgimento è uguale alla sua autoinduzione moltiplicata per $2\pi f = \omega$.

Quindi se si indica l'autoinduzione del primario e del secondario con L_1 e L_2, *possiamo scrivere*:

$$\frac{r}{R} = \frac{\omega L_1}{\omega L_2} = \frac{L_1}{L_2}$$

Vi ricordo ora che l'autoinduzione è dal canto suo proporzionale al quadrato del numero di spire. Se indichiamo con N_1 e N_2 il numero di spire del primario e del secondario, possiamo quindi scrivere:

$$\frac{r}{R} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

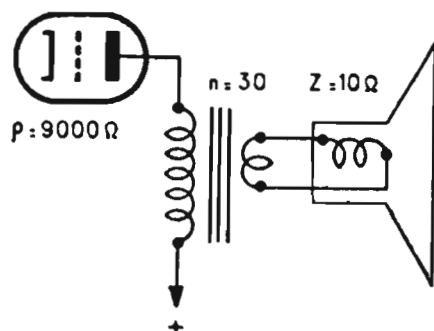



Fig. 85 - Il trasformatore abbassatore permette di adattare la b a s s a impedenza della bobina mobile dell'altoparlante alla elevata resistenza interna del tubo d'uscita.

Ma Ignoto, che cos'è questo N_1/N_2? Cercate di ricordarvi che questo rapporto fra i numeri di spire, viene chiamato *rapporto di trasformazione n.* Si può quindi dire che:

$$\frac{r}{R} = n^2 \text{ od anche } n = \sqrt{\frac{r}{R}}$$

Questo risultato è molto importante. Prendete un tubo di potenza che necessiti di una resistenza di carico di 9.000 Ω.

Se esso deve erogare su un altoparlante la cui bobina mobile ha un'impedenza di 10 Ω, occorre interporre fra i due, un trasformatore con rapporto:

$$n = \sqrt{\frac{9.000}{10}} = \sqrt{900} = 30$$

Ma, mi fermo qui, per ora. Poichè non intendo sabotare la benefica azione dell'aspirina.

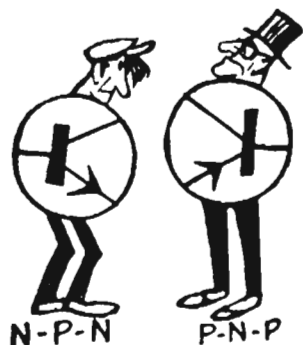
Con tanti auguri di guarigione, sono il vostro amico

Curioso

DECIMA CONVERSAZIONE

Nel corso delle precedenti conversazioni, Curioso e Ignoto hanno studiato il comportamento individuale del transistore. Oggi intendono esaminarne la sua vita in società.
Le relazioni fra diversi transistori cooperanti in un apparecchio sono assicurate mediante circuiti di collegamento. Questi ultimi devono trasmettere ad ogni transistore successivo, l'energia raccolta all'uscita da quello che lo precede.
Si vedrà che, oltre i circuiti di collegamento classici della tecnica dei tubi, si possono impiegare qui molte combinazioni ingegnose proprie al transistore, che dopo aver sorpreso Ignoto, ne susciteranno l'entusiasmo...

SOMMARIO: I circuiti fondamentali coi transistori N-P-N- — *Vantaggi ed inconvenienti del collegamento mediante trasformatore — Regolazione dell'intensità sonora — Collegamento mediante resistenza-capacità — Amplificatore a corrente continua — Circuiti a simmetria complementare — Transistori in tandem.*

COLLEGAMENTI D'OGNI GENERE

Ignoto. - In questi ultimi tempi, Curioso, non mi avete parlato che dei transistori *P-N-P*, trattando i *N-P-N* come parenti poveri.

Curioso. - Vi sono per questo, due ragioni. La prima è che il tipo *N-P-N* è di gran lunga il più diffuso. E la seconda è che tutto ciò che noi diciamo del *P-N-P* può essere ugualmente applicato al *N-P-N*, invertendo semplicemente le polarità delle sorgenti ed ovviamente dei condensatori elettrolitici.

Ign. - E' per questo che mi sono prodigato, adattando ai transistori *N-P-N* i tre circuiti fondamentali che abbiamo esaminato l'ultima volta. Ho terminato questi schizzi sul mio letto di sofferenze.

Cur. - Non esageriamo ora! A giudicare dall'esattezza che mi compiaccio a riconoscere perfetta, dei vostri schemi, quest'influenza non ha attaccato grandemente le vostre facoltà intellettuali.

Ign. - Spero di no, perchè ho fretta di passare allo studio di circuiti completi di amplificatore e ricevitore. Penso d'altronde che tutto ciò che si fa per i tubi elettronici, possa essere ugualmente applicato ai transistori, tenuto conto, beninteso, dei valori delle loro resistenze d'entrata e d'uscita.

UNA DIFFERENZA FONDAMENTALE

Cur. - Sì e no, Ignoto. Non siate però sorpreso da questa risposta sibillina. Evidentemente, tutti i circuiti di collegamento, impiegati nei circuiti a tubi elettronici, sono ugualmente utilizzabili per i tran-

sistori. Ma vi è purtuttavia, una differenza fondamentale fra i due: nei circuiti a tubi, ogni stadio applica al seguente una *tensione* amplificata. Ed unicamente lo stadio d'uscita, eccitato anch'esso (quasi sempre) da una tensione, deve erogare della potenza. Per contro, in un apparecchio a transistori, ogni stadio trasmette al successivo una certa *potenza*, ch'esso ha amplificato e che il seguente amplificherà a sua volta.

E' come dire che un ricevitore a transistori costituisce una catena di stadi ove la potenza cresce progressivamente.

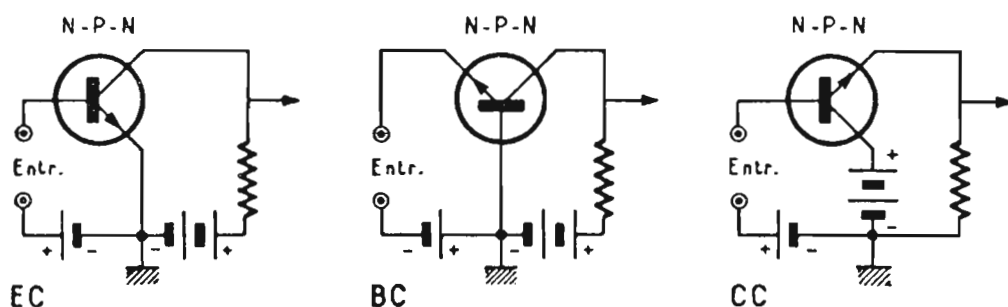



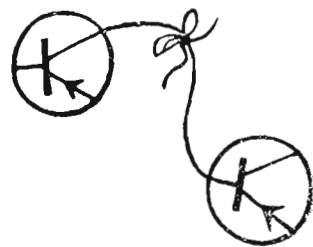
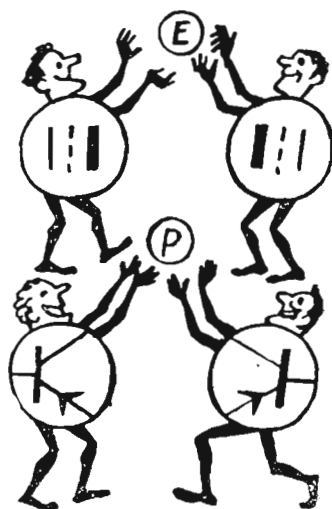
Fig. 86 - I tre circuiti fondamentali realizzati con transistori del tipo *N-P-N*. Notare la polarità delle batterie.

Ign. - Riconosco che ciò cambia radicalmente l'aspetto delle cose. Nella vostra lettera mi avete spiegato chiaramente che, se si cerca di applicare il massimo di tensione alla resistenza d'utilizzazione, si ha interesse a prenderla di valore elevato. E' esattamente ciò che si procura di fare nei circuiti a tubi. E ciò si presenta facile dato che la resistenza d'entrata dei tubi è infinita. Ma coi nostri transistori, noi cerchiamo di trasmettere il massimo di potenza. Per fare questo, occorre che la resistenza d'utilizzazione abbia lo stesso valore della resistenza della sorgente. Ora, nei tre circuiti che noi abbiamo esaminato, la resistenza d'uscita e la resistenza d'entrata hanno dei valori ben diversi. Dal che concludo, con la mia logica di ferro, che è assolutamente indispensabile assicurare l'adattamento delle impedenze con l'aiuto di un trasformatore. Di conseguenza, il solo modo di collegamento applicabile ai transistori è il trasformatore.

Cur. - Oh! giovinezza impetuosa che cerca l'assoluto!... Sono desolato di contraddirvi, ma nel campo dei transistori, il collegamento per resistenza-capacità (e in modo più generale, per impedenza) è largamente usato. Si può anche, e voi lo vedrete presto, trascurare ogni organo di collegamento, collegando direttamente l'uscita di uno stadio all'entrata del successivo.

Ign. - Ma come? Con un semplice pezzetto di filo?

LE QUALITA' ED I DIFETTI DEL TRASFORMATORE

Cur. - Certamente. Ma procediamo per ordine. E poichè voi manifestate tanta simpatia per il trasformatore, incominciamo da questo. Voi avete citato una delle sue qualità: esso permette di adattare perfettamente l'impedenza d'uscita di uno stadio, a quella d'entrata del successivo. Si assicura così la trasmissione ottima di potenza. Ma esso è dotato di altre virtù. La bassa resistenza ohmica dei suoi

avvolgimenti determina delle cadute di tensione sufficientemente basse, ciò che permette di servirsi di sorgenti d'alimentazione di tensione poco elevata. E soprattutto, non dimenticatelo, accordando il primario o il secondario, od entrambi simultaneamente, si assicura la desiderata selettività degli stadi ad alta frequenza e media frequenza(ove tra l'altro, giuocando sul grado di accoppiamento dei due circuiti, si perviene ad ottenere la larghezza voluta della banda di frequenza passante.

Ign. - Vedete bene che il trasformatore non ha che delle qualità E non vedo perchè...

Cur. - Occorre che vi mostri ora il rovescio della medaglia. Anzittutto, qualsiasi siano i progressi della miniaturizzazione, il trasformatore occupa sempre un volume superiore a quello degli organi di collegamento per resistenza-capacità, almeno per quanto riguarda la *B.F.*, poichè in *A.F.* e in *M.F.*, nessun'altro tipo di collegamento gli disputa il posto. Nella competizione che si verifica nel campo della *B.F.*, il trasformatore si rivela ben più costoso delle resistenze e dei condensatori di collegamento.

Ign. - Insomma, lo si sacrifica per delle meschine considerazioni di spazio e di denaro.

Cur. - I costruttori di ricevitori a transistori non sono affatto dei filantropi e poichè si chiede loro dei ricevitori sempre più piccoli, essi realizzano una doppia economia, rinunciando al trasformatore. Quest'ultimo presenta poi un ulteriore inconveniente, quando lo si impiega all'entrata di un amplificatore di guadagno elevato.

Ign. - Ma quale, perbacco?

Cur. - Le induzioni di parassiti captate dai suoi avvolgimenti, che una volta amplificate, rischiano di essere una causa di perturbazioni; ciò che esclude l'impiego dei trasformatori la dove esistono dei campi parassiti intensi.

ED ECCO DEGLI SCHEMI PRATICI

Ign. - Ecco qua il mio povero trasformatore accusato di tanti peccati!... Potrei almeno sapere come lo si utilizza, quando le particolari considerazioni di economia e la presenza di parassiti non ne interdicano l'impiego?

Cur. - Lo schema non differisce molto da quello di un circuito a tubi elettronici. Come vedete, vi ho rappresentato qui, due transistori in circuito *E.C.* Il trasformatore TR_1 serve ad eccitare il primo, e TR_2 assicura il collegamento fra i due. Quest'ultimo trasformatore avrà molto meno spire al secondario che al primario. Se la resistenza d'uscita del primo transistore è di 20.000 Ω, e quella d'entrata del secondo di 2500 Ω, per assicurare il miglior adattamento, il rapporto di trasformazione deve essere:

$$n = \sqrt{\frac{R_u}{R_e}} = \sqrt{\frac{20.000}{250}} = \sqrt{80} = 9 \text{ circa.}$$

Avremo pertanto, nel secondario, una corrente nove volte più intensa che nel primario.

Ign. - Vedo che le tensioni di base sono fissate da dei divisori di tensione R_1-R_2 e R_3-R_4 disaccoppiati da condensatori. Constato inoltre che voi avete previsto, nel circuito degli emettitori, delle resistenze R_5 e R_6 destinate a compensare gli effetti delle variazioni di temperatura.

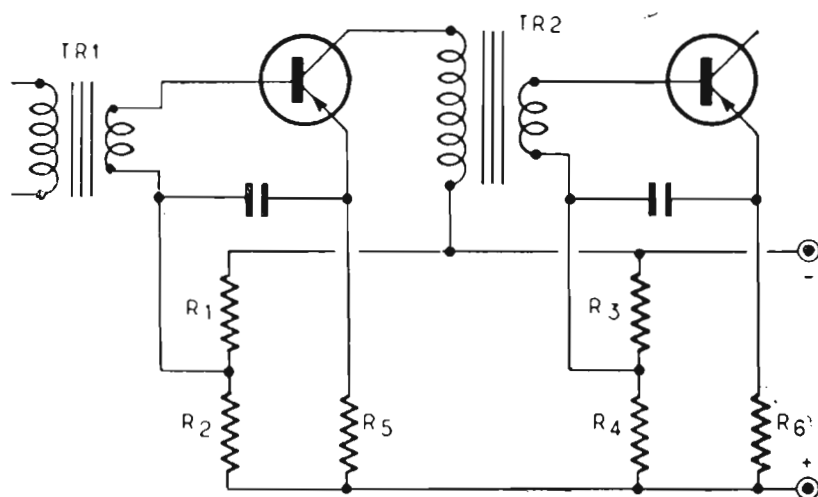



Fig. 87 - Collegamento per trasformatore di due stadi in circuito *E.C.* - Il primo stadio è anch'esso eccitato mediante trasformatore.

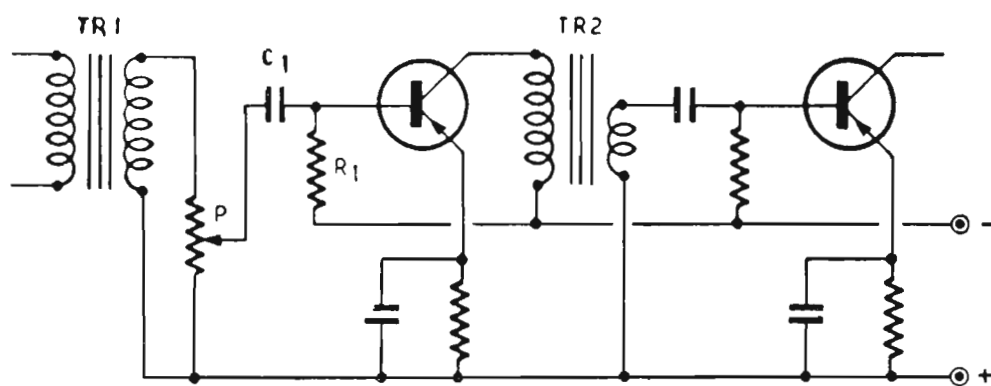



Fig. 88 - Collegamento ibrido per trasformatore e resistenza-capacità con regolazione del guadagno mediante un potenziometro *P.*

Cur. - Bravo Ignoto! La vostra malattia non ha per nulla alterato la vostra eccellente memoria.

Ign. - Esaminando il vostro schema, mi domando come riusciate a realizzare il controllo dell'intensità sonora o del « volume » come si usa dire.

Cur. - Infatti, si tratta di un controllo del guadagno. Si potrebbe farlo applicando una controreazione, il cui tasso sarebbe regolabile. Personalmente, trovo questo metodo detestabile. Anzitutto esso non permette di ridurre il guadagno a zero onde ottenere il silenzio totale. Inoltre, nello stesso tempo che si modifica l'intensità sonora si cambia il tasso di distorsione, ottenendone il massimo proprio alla massima potenza dell'audizione.

Ign. - Cioè quando le deformazioni sono più difficili da sopportare. Cosa proponete di fare, allora?

Cur. - Se all'entrata dell'amplificatore non è prevista alcuna regolazione del guadagno, perchè non fare uso di un potenziometro *P*,

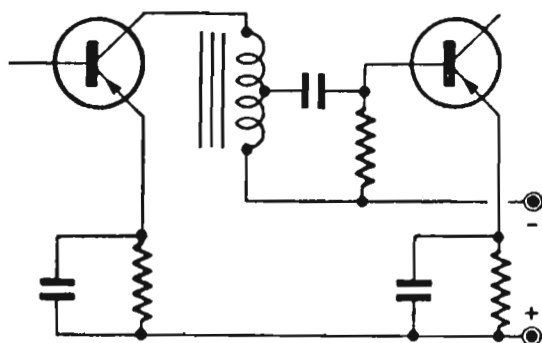
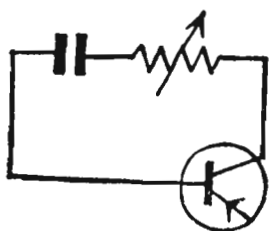
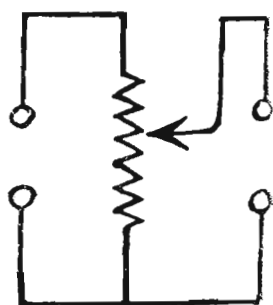



Fig. 89 - Collegamento per autotrasformatore.

per prelevare a volontà una frazione più o meno grande della tensione che appare al secondario del primo trasformatore? In tal modo si può facilmente dosare l'intensità del suono. Il cursore è collegato alla base del primo transistore, attraverso un condensatore di collegamento C_1. E la polarità della base è assicurata dalla resistenza R_1. La stessa disposizione viene adottata per il collegamento fra i due transistori (fig. 88).

Ign. - Il nostro secondo schema ha l'aria di un centauro: come

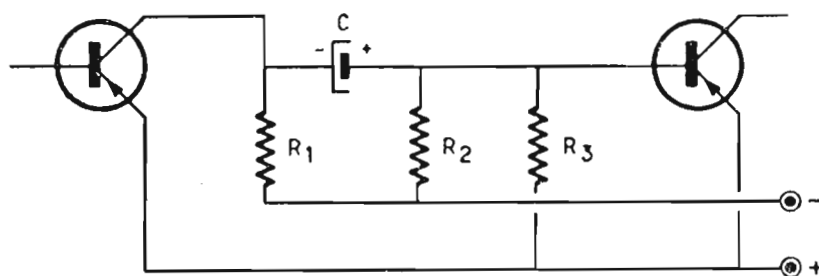



Fig. 90 - Collegamento per resistenza-capacità.

questo essere mitologico, mezzo uomo e mezzo cavallo, il vostro amplificatore è mezzo a trasformatore e mezzo a resistenza-capacità.

Cur. - Riconosco che in questo schema, noi perdiamo la semplicità dello schema a trasformatore « puro ». Forse ne sarete molto soddisfatto per ciò ne deriva logicamente: il collegamento per autotrasformatore. Questo sarà generalmente un abbassatore, in modo da adattare la elevata resistenza d'uscita del transistore precedente, a quello del successivo, supponendo che i due transistori siano in *E.C.*

Ign. - Non mi sembra, nè carne, nè pesce.

IL CIRCUITO 100% RC

Cur. - Poichè i circuiti ibridi vi ripugnano, converrà passare senz'altro all'amplificatore a resistenza-capacità, che nella sua forma più pura è rappresentato nello schema che qui vi mostro (fig. 90).

Ign. - Ma è la copia fedele dello stesso circuito a valvole! La resistenza di carico R_1 del collettore, corrisponde a quella del circuito anodico. Le resistenze R_2 e R_3, che fissano il potenziale della base, sono le sorelle minori della resistenza di griglia. In quanto al condensatore di collegamento... sono sorpreso di vedere che è del tipo elettrolitico. Non si può proprio utilizzare l'ottimo condensatore a carta di qualche 0,05 μF, come lo si impiega negli amplificatori a valvole ove svolge perfettamente il suo compito?

Cur. - Sarebbe disastroso nel nostro caso. Quando si tratta di tubi, esso è associato ad una resistenza di fuga di griglia, che ha il valore classico di 0,5 MΩ. Qui, il complesso delle resistenze R_2 e R_3 in parallelo, ha un valore dell'ordine di 1000 Ω, ed è per soprappiù, posto in derivazione sulla resistenza d'entrata r_e del secondo transistore. Questa resistenza invisibile, ma presente, è dello stesso ordine di grandezza di R_2-R_3, diciamo ancora di 1000 Ω.

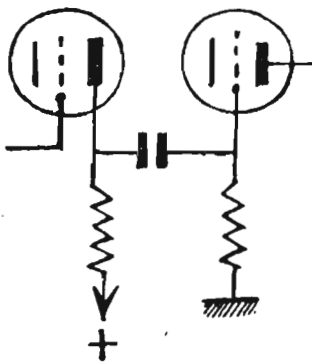
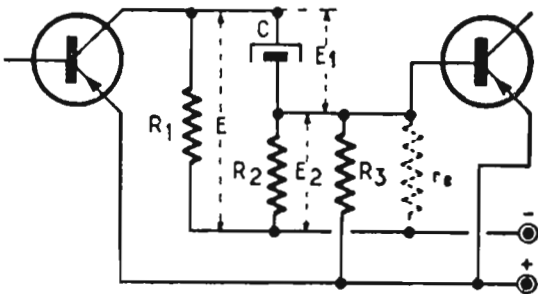



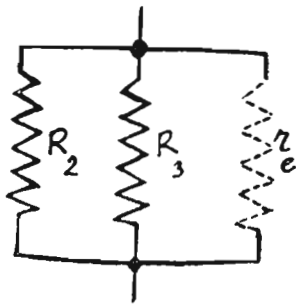
Fig. 91 - Identico schema della fig. 90, ma presentato in modo da mettere in evidenza il divisore di tensione costituito dal condensatore d'accoppiamento C e le resistenze R_2 e r_e in parallelo. La resistenza interna della sorgente è trascurabile.

Ign. - Tutte e tre formano dunque una resistenza di 500 Ω. Ma non vedo perchè...

Cur. - Pazienza! Possiamo ridisegnare il nostro schema in un modo un pò differente, da mostrare che il condensatore C con la resistenza R_2, R_3 e r_e, costituisce un vero e proprio divisore per la tensione E che appare sulla resistenza di carico R_1. Qual'è allora la sua resistenza capacitiva?

Ign. - Essa dipende dalla frequenza delle correnti e diminuisce quando questa aumenta.

Cur. - Evidentemente. Ebbene, se voi prendete il vostro condensatore da 0,05 μF, del quale siete così fiero, con una corrente di 50 hertz (questo termine è preferibile ai « periodi al secondo »), la resistenza capacitiva capacitanza di C di circa 65.000 Ω, ossia centotrenta volte superiore alle resistenze R_2, R_3 e r_e in parallelo.

Ign. - Che disastro! E poichè le tensioni E_1 e E_2 si ripartiscono proporzionalmente ai valori delle resistenze, E_2 non è che la centotrentesima parte della tensione E. Noi non trasmettiamo quindi al secondo transistore, che questa infima frazione (1).

Cur. - Ecco perchè, per evitare uno stupido sciupio, occorre adottare un condensatore di forte capacità. Con un elettrolitico di 10 μF,

(1) Un'analisi più spinta, che tenga conto particolarmente della resistenza d'uscita del primo transistore, mostrerebbe che la situazione è in realtà meno catastrofica. Ma il ragionamento sopraenunciato rimane valido in prima approssimazione.

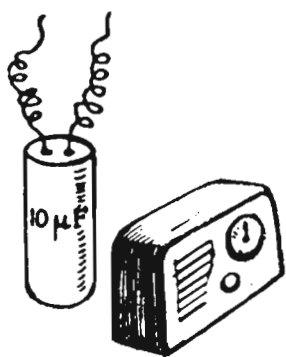
la capacitanza a 50 Hz, non sarà più di 325 Ω. E più di metà della tensione sarà trasmessa. Per delle frequenze più elevate, la capacitanza C sarà ancora più bassa e le cose si presenteranno ancor meglio. Ma una capacitanza insufficiente provocherà una deplorevole attenuazione delle note basse.

ATTENZIONE ALLE POLARITA'

Ign. - Se ben comprendo, nei circuiti a transistori, ove le resistenze hanno valori generalmente molto inferiori a quelli che si impiegano coi tubi, noi faremo largo uso di condensatori elettrolitici. Ma il loro ingombro non sarà proibitivo?

Cur. - Affatto. Perchè i tipi destinati a lavorare sotto tensioni così basse (come è il caso dei transistori) hanno un ingombro ridottissimo e possono venire facilmente collocati nelle filature dei ricevitori tascabili... Occorre però in tal caso fare ben attenzione a rispettare le corrette polarità.

Ign. - Constato che avete collegato il negativo del condensatore al collettore, che deve essere ad un potenziale più negativo della base. Suppongo perciò che, trattandosi di transistori del tipo *N-P-N*, avreste fatto il contrario.

Cur. - E non vi sbagliate. Per mostrarvi quali sono le polarità dei condensatori elettrolitici, a seconda del loro posto nel circuito, vi dò qui lo schema di un amplificatore microfonico. Potete vedere che la regolazione dell'intensità si fa all'entrata del primo transistore, mediante il potenziometro P.

Ign. - E questo eccita la base attraverso il condensatore C_1, il cui negativo è questa volta, collegato alla base.

E' il contrario di ciò che si fa per il condensatore di collegamento C_2, il quale collegato ad un collettore ancor più negativo della base, rivolge verso la base il suo lato positivo... Constato che i due transistori sono provvisti di resistenze R_3 e R_7 di compensazione di temperatura; i condensatori C_3 e C_4 che le disaccoppiano, hanno beninteso, il loro positivo al... positivo dell'alimentazione. Ma cos'è questa resistenza R_5, che avete posta in serie con la resistenza di carico R_4 del primo transistore?

Essa è disaccoppiata, come vedo, dall'elettrolitico C_6, il quale ha anch'esso il suo positivo al polo « più » della batteria.

Cur. - Non riconoscete qui una vecchia conoscenza sovente impiegata nei circuiti a valvole?

Ign. - Perbacco! Ma è il nostro classico disaccoppiamento del circuito anodico... scusate, qui però è nel circuito del collettore. Serve ugualmente a evitare degli accoppiamenti parassiti, originati dall'impedenza comune della sorgente, capaci di provocare delle autooscillazioni?

Cur. - Esattamente. La resistenza interna della sorgente rischia di creare delle reazioni pericolose.

Così, per offrire alle componenti alternative delle correnti, una facile via, è buona pratica collegare ai capi della batteria un condensatore C_5 di sufficiente capacità.

Ign. - Nel vostro schema, per accumulare tutti i perfezionamenti, voi avete introdotto anche una controreazione mista, ove una parte della tensione d'uscita è attraverso R_8 e C_7, applicata ad una resistenza R_2, posta nel circuito dell'emettitore del primo transistore. E' insomma il dispositivo che abbiamo già studiato nella figura 61.

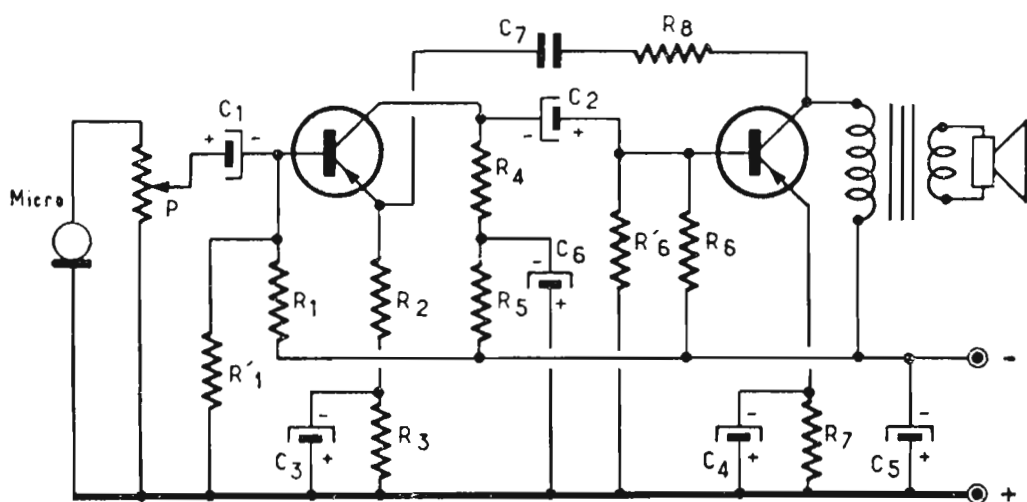



Fig. 92 - Schema completo di un amplificatore microfonico. Il solo condensatore C_7, di capacità dell'ordine di 0,05 μF, utilizzato nel circuito di controreazione, non è del tipo elettrolitico.

LA VIA DIRETTA

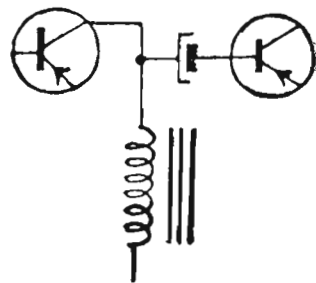
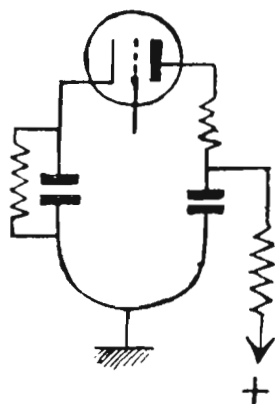
Cur. - Malgrado l'età, la vostra memoria resta buona, Ignoto... Perciò non mi voglio intrattenere ulteriormente sul collegamento a resistenze o più generalmente a impedenze.

Poichè voi potete ugualmente utilizzare al posto della resistenza di carico, un'induttanza, più costosa ed ingombrante, ma di resistenza ohmica bassa... E per ricompensarvi della vostra pazienza, vi voglio presentare un primo schema a collegamento diretto.

Vi potete vedere un primo transistore, in circuito a collettore comune, il cui emettitore è collegato direttamente alla base del secondo che è però in circuito a emettitore comune.

Ign. - Riconosco che questo circuito è molto economico. Ma mi domando come si possa con tanta disinvoltura, sopprimere il condensatore di collegamento.

Cur. - Se si fosse trattato di un circuito a valvole, non si sarebbe potuto farlo che a prezzo di gravi complicazioni, perchè un anodo deve essere portato ad un potenziale positivo elevato, mentre la griglia del tubo successivo deve, al contrario essere polarizzata negativamente. Ma coi transistori le cose si mettono molto meglio.

Le differenze di potenziale sono piccole ed inoltre i potenziali della base e del collettore devono essere nei rispetti dell'emettitore,

dello stesso segno. Per contro, in un tubo elettronico, la griglia deve essere negativa, mentre l'anodo è positivo. Nei circuiti a transistori, pertanto, si riesce senza difficoltà a comunicare ad ogni elettrodo il potenziale necessario, producendo delle cadute di tensione in resistenze di appropriato valore.

Ign. - Voglio provare ad analizzare il vostro schema. Con l'aiuto di frecce metto in evidenza il percorso della corrente d'alimentazione, partendo dal polo negativo della sorgente. Gli elettroni entrano nel primo transistore dal collettore ne escono dall'emettitore e qui la corrente si biforca. Una parte di elettroni attraversa la resistenza di carico R_1, rendendo l'estremità collegata alla base del secondo tran-

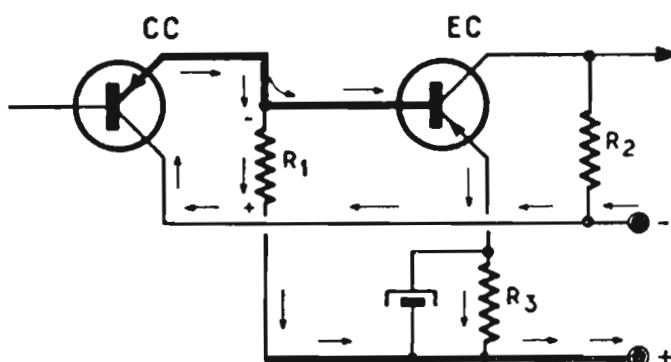
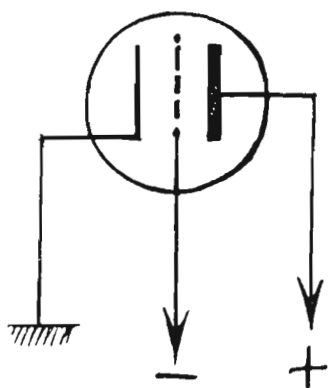
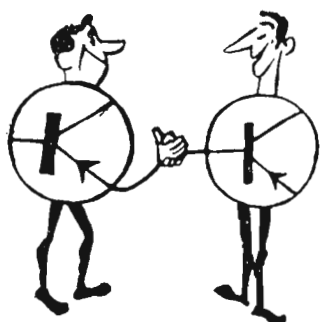



Fig. 93 - Circuito a collegamento diretto. Le frecce indicano il senso della corrente elettronica che provoca nella R_1 la caduta di tensione le cui polarità sono indicate.

sistore, negativo nei rispetti del polo positivo della sorgente. Gli altri elettroni andranno dalla base del secondo transistore verso il suo emettitore. Non è altro che la corrente media di base... Ma certo voi avete ragione: nel primo transistore l'emettitore è positivo nei rispetti al collettore. E nel secondo, la base è negativa nei rispetti dell'emettitore. Tutto è in ordine. E si è risparmiato un condensatore elettrolitico ed una resistenza.

Cur. - Ed i vantaggi del collegamento diretto non si limitano solo a questo. Pensate che un condensatore non trasmette mai in modo uguale tutte le frequenze. Anche con una capacità di elevato valore, non si può far passare delle variazioni di tensione molto lente. Qui invece noi abbiamo realizzato un vero e proprio amplificatore di corrente continua.

Ign. - Vediamo un po', Curioso. Come si può parlare di amplificazione di qualcosa che è costante?

Cur. - Riconosco che il termine non è stato scelto felicemente. Infatti, si chiamano così, gli amplificatori destinati ai segnali a frequenze molto basse: quelli di qualche periodo per secondo od anche quelli il cui periodo può durare parecchi secondi. Di più, si può aver a che fare con tensioni o correnti non periodiche, che variano lentamente. E quanto accade nel campo della biologia. Gli amplificatori

a corrente continua sono in tal caso i soli che si possono impiegare.

Ign. - Vedo già un altro impiego ove essi sarebbero preziosi: l'amplificazione dei segnali video in televisione ove è molto importante conservare quella componente continua alla quale un condensatore sbarra il passo.

PRIMO RICORSO ALLA SIMMETRIA

Cur. - Caro Ignoto, ma vi hanno pensato prima di voi. E per consolarvi della delusione che provate una volta di più, constatando che vi rubano le vostre idee, prima che esse nascano, vi presento un altro circuito a collegamento diretto, ove i due transistori sono utilizzati in *E.C.* Ma li si prende di tipo opposto: un *N-P-N* ed un *P-N-P*. E si mettono a profitto le loro proprietà di *simmetria complementare.*

Ign. - Seguendo, lungo le frecce il cammino degli elettroni, constato senza difficoltà, che anche qui, tutto si svolge in modo perfetto. Il collettore del primo transistore è reso positivo nei rispetti del suo

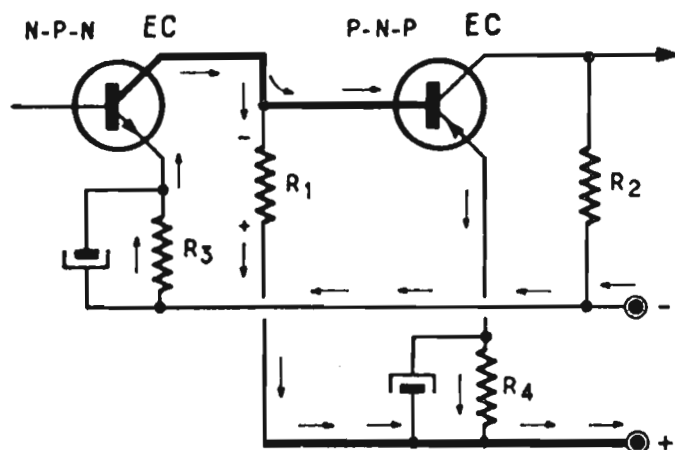



Fig. 94 - Altra possibilità di realizzare un collegamento diretto grazie alla simmetria complementare dei transistori di tipo opposto.

emettitore, esattamente come richiesto da un *N-P-N.* Mentre nel secondo transistore, che è un *P-N-P,* la base è negativo nei rispetti dell'emettitore. Cosa desiderare di più? Non vi è alcun mezzo di sopprimere le vostre resistenze di stabilizzazione R_3 e R_4 coi loro condensatori di disaccoppiamento, al fine di ottenere un'economia ancora più spinta?

Cur. - Se non occorre che il valore assoluto della componente continua debba essere mantenuto costante, potrete anche omettere questi elementi, ma vi priverete del sistema di compensazione della temperatura.

Ign. - Peccato, perchè non vi nascondo la simpatia che mi ispirano questi circuiti.

COPPIE IN SERIE

Cur. - Vi prego di notare, caro amico, che esistono altri circuiti a collegamento diretto molto più stabili in funzione della temperatura. Per esempio il circuito a coppia o in « tandem » dei transistori dello stadio preamplificatore e dello stadio finale.

Ign. - Ma cosa c'entra questa storia di biciclette?

Cur. - Si chiamano « tandem », delle coppie di transistori alimentati in serie. In tal modo la componente continua delle correnti attraversa successivamente i due transistori, ciò che determina una eccellente stabilizzazione. Ecco qui un circuito ove il primo transistore è montato in collettore comune ed il secondo in emettitore comune.

Avete compreso come ciò funziona?

Ign. - Una volta di più seguiamo la guida; voglio dire le frecce. Ciò mi riporta al tempo in cui, boy-scout, partecipavo a dei giuochi ove si doveva seguire un percorso indicato da frecce... Anche qui allora, partiamo dal negativo della sorgente. Dopo aver attraversato il primario del trasformatore d'uscita, i nostri bravi elettroni entrano nel secondo transistore dal collettore e lo lasciano dall'emettitore, per precipitarsi nel collettore del primo transistore ed uscirne dal-

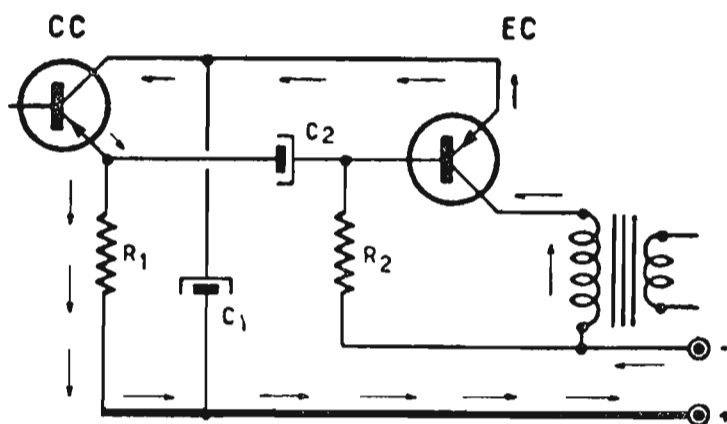



Fig. 95 - Tandem di due transistori alimentati in serie. Le frecce indicano sempre il senso della corrente elettronica.

l'emettitore. Dopo questo brillante comportamento, non resta loro che attraversare la resistenza di carico per ritornare all'ovile, voglio dire al polo positivo della sorgente.

Cur. - E' quindi, lo vedete, la stessa corrente che passa successivamente, essendo il collettore del primo, collegato all'emettitore del secondo e col loro punto comune disaccoppiato dal condensatore C_1 onde evitare delle variazioni di potenziale che avrebbero potuto essere provocate dalla componente alternativa:

Ign. - Riconosco che questo schema non manca di eleganza.

Si potrebbe applicare lo stesso principio a due transistori collegati in *E.C.*?

Cur. - Certamente. E tale « tandem » procura generalmente un guadagno superiore a quello del precedente. Seguite il percorso delle frecce. Vedete che anche qui, è la stessa corrente che attraversa successivamente i due transistori. Per la componente continua, essi sono

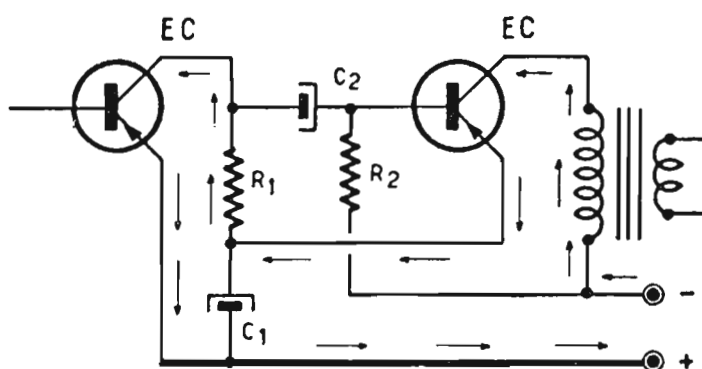



Fig. 96 - Altro tandem composto di due transistori montati in *E.C.* e alimentati in serie.

quindi posti in serie. Per contro, nei rispetti dei segnali da amplificare, è il più classico dei collegamenti per resistenza-capacità.

Ign. - Tutte queste astuzie di circuiti mi hanno tutta l'aria di esercizi di alta acrobazia e mi danno le vertigini.

Cur. - In tal caso, vi lascio riposare e vi auguro una buona notte.

UNDICESIMA CONVERSAZIONE

Passando in rivista i diversi modi di collegamento fra stadi, i nostri amici hanno mirato soprattutto all'amplificazione a bassa frequenza. Mentre ne hanno studiato gli schemi principali, hanno però trascurato il problema dello stadio d'uscita. Ora, quando si tratta di erogare una certa potenza, si ricorre a dei circuiti e a dei regimi di funzionamento particolare che saranno l'oggetto della presente conversazione.

*SOMMARIO: Scelta del punto di funzionamento — Circuito economizzatore a tensione fluttuante — Push-pull classe B — Sfasamento da trasformatore — Inversore di fase — Catodyna a transistori — **Push-pull a** simmetria complementare — Schema pratico dello stadio d'uscita.*

ECONOMIA E POTENZA

IGNOTO COMMETTE UN PECCATO D'ORGOGLIO

Ignoto. - Con le cognizioni che ho acquistato nel campo delle basse frequenze, credo di poter calcolare tutti gli elementi di amplificatori a transistori.

Curioso. - Ho sempre ammirato la vostra modestia...

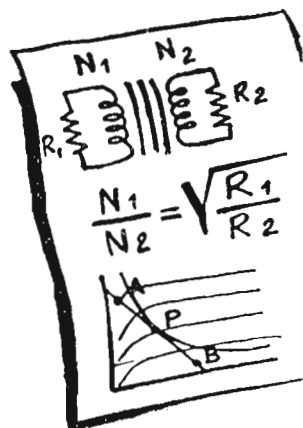
Ign. - Non ironizzate. In questo campo, le cose sono semplici e chiare. Se si tratta di un collegamento a trasformatori, calcolo il rapporto che assicura il miglior adattamento. E, credetemi, l'estrazione di una radice quadrata non fa paura... In quanto al collegamento per resistenza-capacità, non mi avete insegnato a tracciare la retta di carico? La traccerei in modo che, tangente all'iperbole della potenza limite, essa permette di avere la maggior ampiezza di segnale all'entrata, col punto di funzionamento nel mezzo.

Cur. - A rischio di disingannarvi, vi devo dire che le cose sono ben lontane dall'essere così semplici. Voi avete ragione in prima approssimazione. Ma nella scelta dei valori, occorre anche tener conto della potenza disponibile all'entrata, della larghezza della banda di frequenza da trasmettere, del ruolo della controreazione, del tasso di distorsione massima tollerata, e cos'altro ancora?

Ign. - Basta così. Riconosco di aver peccato per eccesso d'orgoglio... Comunque le cose sembrano presentarsi chiaramente, quando si ricorre al sistema di curve ed alla retta di carico. Il nostro segnale d'entrata (si può considerare sia la tensione che l'intensità della corrente di base) ha il diritto di occupare la porzione della retta di carico, limitata da due punti: da un lato *A*, ove le curve incominciano ad accusare un gomito, dall'altra parte *B*, ove la corrente di base si avvicina allo zero.

Cur. - Ciò che, lo sapete, è una causa di distorsioni non lineari.

Ign. - Certamente. Inoltre, si deve scegliere il punto di funzio-

namento P, ad uguale distanza da A e da B. L'ampiezza massima del segnale d'entrata è allora PA oppure PB, fra i valori corrispondenti di I_b o di E_b. Nel mio schizzo, quest'ampiezza è dell'ordine di 275 mV. Essa fa variare la corrente di collettore fra 7 e 57 mA, col valore medio di 32 mA, con un'ampiezza quindi di 25 mA.

Cur. - Perfetto, Ignoto. Spero che sarete completamente soddisfatto del funzionamento del vostro transistore.

NIENTE SCIUPIO

Ign. - Non del tutto però. Se le cose marciano bene quando il segnale è forte, sono però spaventato per lo sciupìo d'energia in assenza di modulazione o nel caso di segnali deboli. Qualunque sia l'ampiezza, noi abbiamo sempre lo stesso consumo di corrente corrispondente al

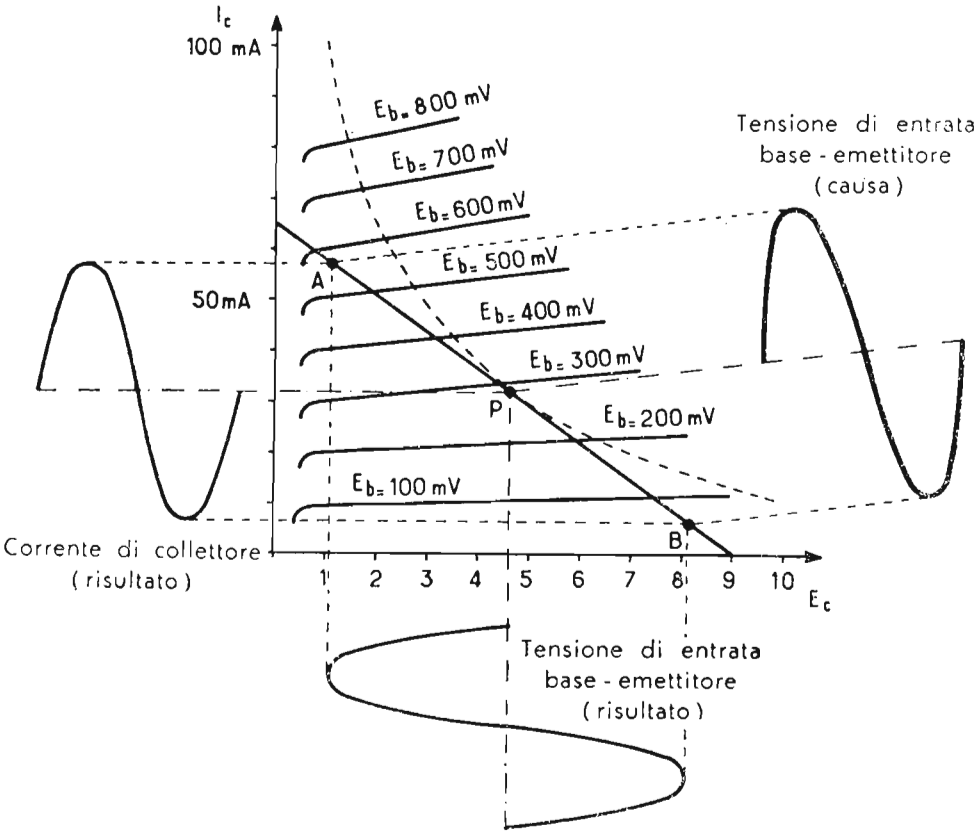
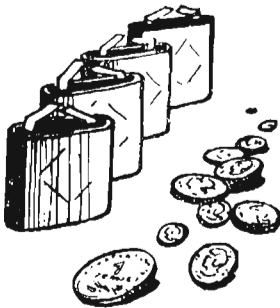
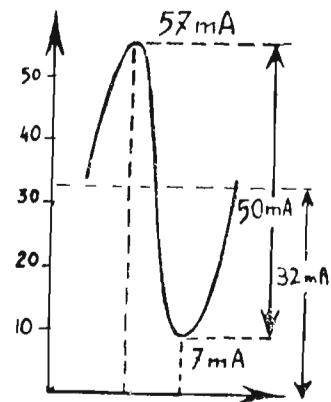



Fig. 97 - Questo diagramma mostra come la corrente e la tensione di collettore variano sotto l'azione di un segnale applicato all'entrata. - Tale segnale ha l'ampiezza massima ammissibile.

punto P. Ora, per dei segnali deboli, si sarebbe potuto spostare il punto di funzionamento più in basso, su una retta di carico corrispondente a correnti più deboli, in P^1 per esempio.

In tal modo, il consumo sarà minore e noi economizzeremo delle pile che sono alquanto costose.

Cur. - Volete rovinare i loro fabbricanti?

Ign. - No, ma ritengo che ascoltando una sinfonia, non sia razio-

nale dissipare durante i pianissimi, la stessa potenza richiesta da un pieno d'orchestra. Solamente non vedo affatto in qual modo si possa obbligare il punto di funzionamento a spostarsi verso una retta di carico inferiore, onde dispensare esattamente la potenza necessaria per riprodurre senza distorsioni, i segnali di diverse ampiezze.

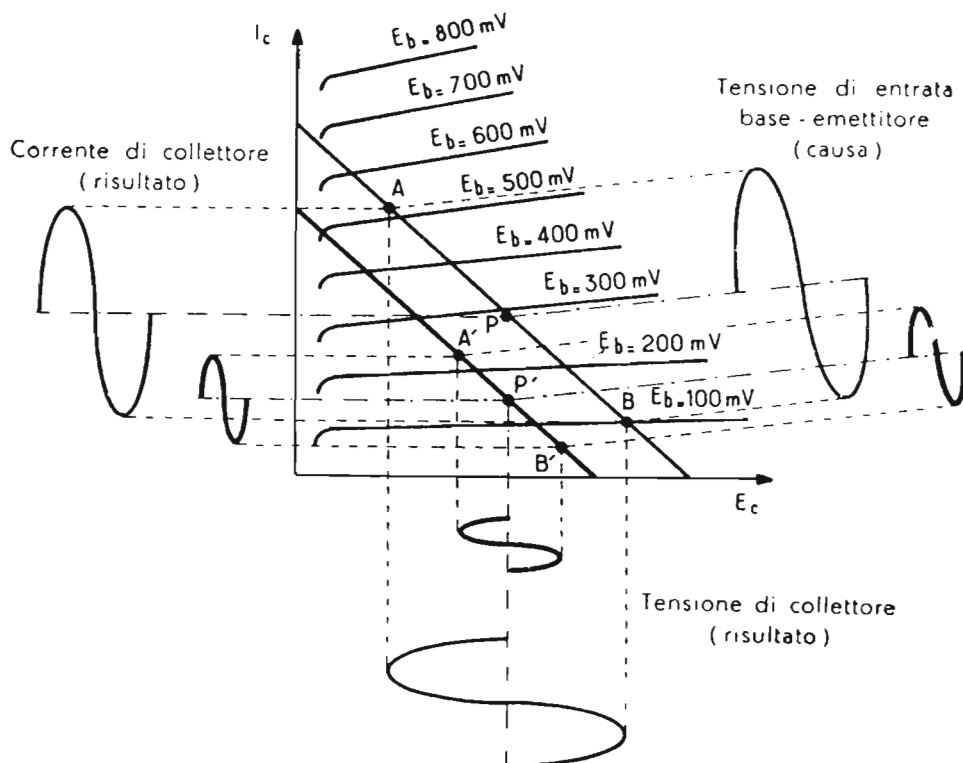
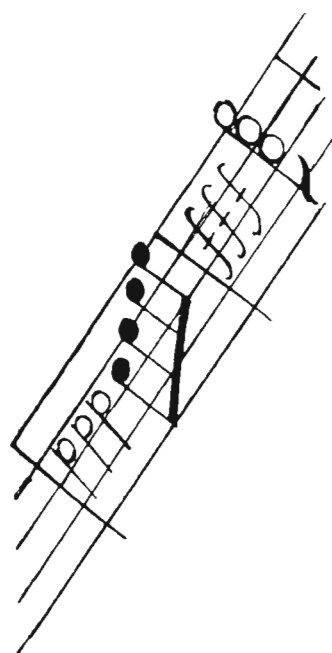
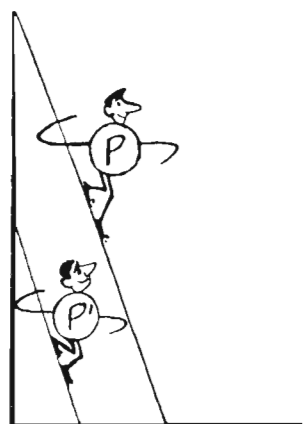



Fig. 98 - E' più razionale spostare il punto di funzionamento da *P* in *P'*, quando l'ampiezza del segnale diminuisce.

Cur. - Questa preoccupazione di evitare lo sciupìo è lodevole. Perciò vi indicherò volontieri il modo appropriato. Affinchè il vostro punto possa spostarsi da una retta di carico ad un'altra, occorre che la polarizzazione sia resa variabile (1). Il suo valore deve aumentare con l'ampiezza del segnale. E' sufficiente quindi di controllarla mediante il segnale stesso.

Ign. - Ma come? Poichè il segnale è alternativo, mentre la polarizzazione è continua.

Cur. - Voi conoscete perfettamente il mezzo di trasformare una corrente alternativa in continua: il raddrizzamento. Ebbene, è ciò che si fa per ottenere la polarizzazione variabile. Ecco uno schema pratico di economizzatore, al quale si possono apportare molte varian-

(1) Modificando la polarizzazione, noi spostiamo la retta di carico parallelamente a sè stessa. Essa mantiene la sua inclinazione che corrisponde all'impedenza di carico data. Quest'ultima possiede una resistenza ohmica trascurabile (è il primario del trasformatore d'uscita), di modo che la tensione media E_c sul collettore non dipende dalla polarizzazione. Il punto di funzionamento passa così da P a P' spostandosi lungo una medesima verticale. La presenza di una resistenza ohmica la sposterebbe orizzontalmente.

ti. Vedete che un avvolgimento ausiliario sul trasformatore d'uscita, permette di prelevare dei segnali amplificati che, mediante un diodo *D* a semiconduttore, sono raddrizzati, creando così ai capi della resistenza *R*, una caduta di tensione, che rende il punto *X* più o meno negativo. Il condensatore *C* serve a livellare la tensione ottenuta, in modo che essa non possa seguire le variazioni rapide del segnale, ma corrisponda al suo valore medio.

Ign. - Sì, è il volano regolatore, come il condensatore che con una resistenza, serve a introdurre una costante di tempo nel regolatore anti-fading (CAV).

Cur. - Paragone molto appropriato, poichè il nostro dispositivo ricorda sotto più di un profilo il CAV-anti-fading, ma un CAV alla rovescia. Infatti, le variazioni d'ampiezza delle tensioni amplificate vengono utilizzate, dopo il raddrizzamento, per comandare la polarizzazione all'entrata. In pratica, le tensioni variabili del punto *X* sono applicate al punto comune delle resistenze R_2 e R_3, che collegano la

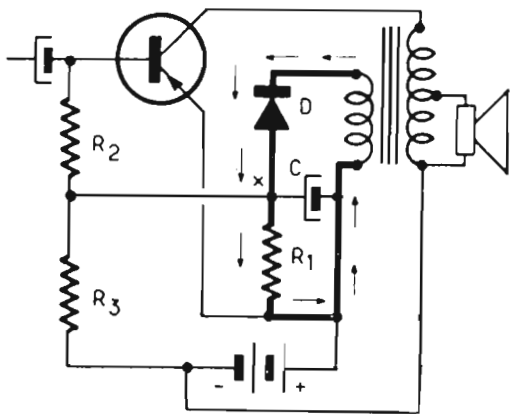



Fig. 99 - Stadio d'uscita con circuito economizzatore tracciato in tratto marcato, permettente di aumentare la tensione di polarizzazione quando l'ampiezza del segnale aumenta.

base al polo negativo della sorgente. Una scelta adatta dei valori delle tre resistenze permette di rendere la polarizzazione proporzionale all'ampiezza dei segnali. In tal modo, la base diviene tanto più negativa quanto più i segnali sono forti.

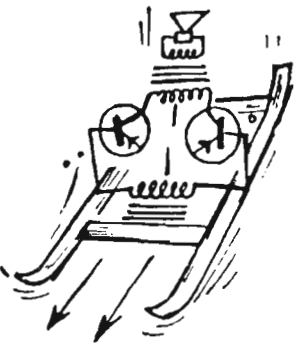
EVVIVA LA CLASSE B

Ign. - Il vostro circuito economizzatore mi piace molto. Quando monterò il mio ricevitore a transistori, esso avrà in uscita, un bel push-pull con questo dispositivo a tensione di polarizzazione variabile.

Cur. - In un push-pull, mio caro Ignoto, è possibile fare ancor meglio: potete applicarvi una polarizzazione fissa, sufficientemente bassa affinchè la corrente, a riposo, sia pressochè nulla.

Cur. - Volete parlare del regime d'amplificazione in classe *B*? Nei circuiti a valvole, ciò corrisponde al funzionamento presso il gomito inferiore della caratteristica di corrente anodica in funzione della tensione di griglia.

Cur. - Sì, è proprio sulla classe *B* che vorrei intrattenervi.

Collocate il punto *P* ad un valore di corrente di collettore molto

piccolo, ma non nullo. Ciò perchè se andate troppo sotto, i segnali deboli si troveranno nella porzione non lineare della caratteristica.

Ign. - Vedo però che le alternanze che accrescono la tensione di base, producono un forte aumento della corrente di collettore, mentre

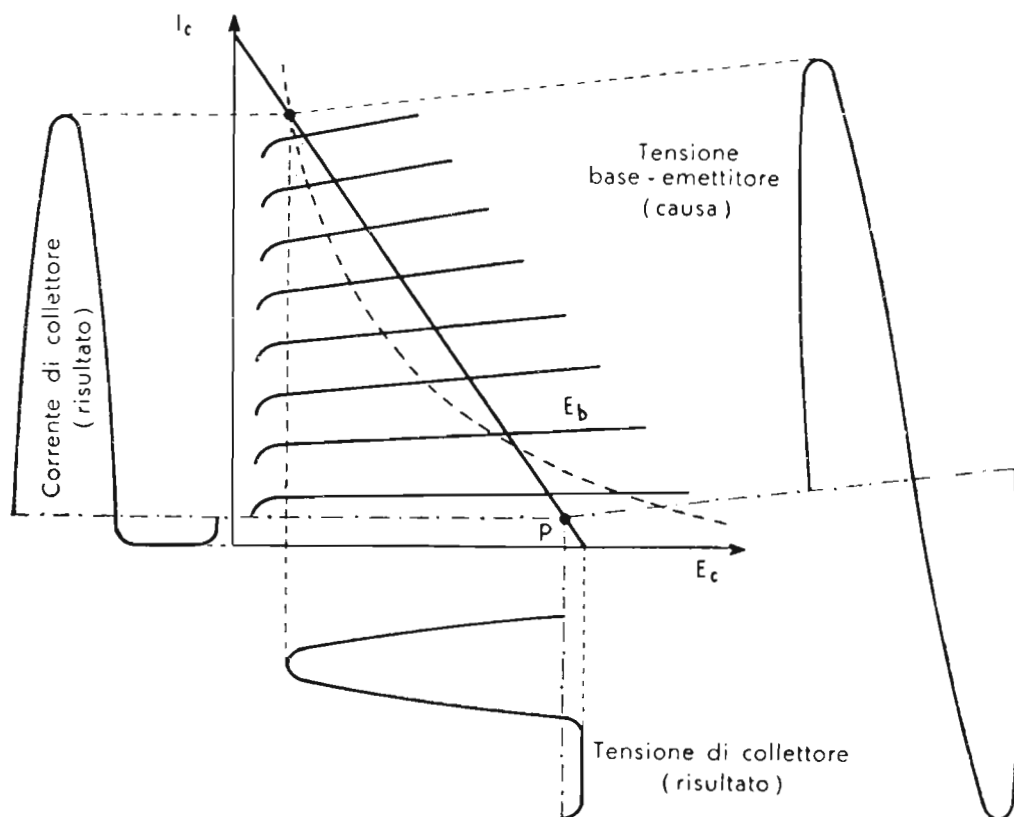



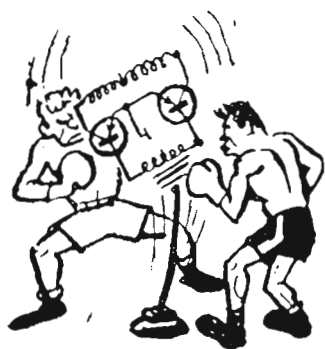
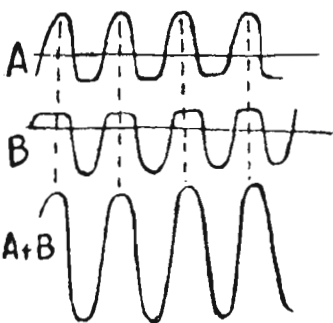
Fig. 100 - Nel regime di classe B, il punto di funzionamento è relegato nei pressi dell'estremità inferiore della retta di carico, ciò che permette di applicare dei segnali di ampiezza due volte maggiore che in classe A. La corrente d'uscita è, lo si vede, molto deformata.

quelle dirette in senso opposto non le modificano che lievemente. La distorsione sarà tremenda!

Cur. - Essa non permetterebbe dunque di impiegare un transistore solo, in classe *B*. Ma se ne montate due in push-pull, voi ripartirete il lavoro fra di loro: uno si incarica delle alternanze negative, l'altro delle alternanze positive. E la simmetria del circuito fa in modo che le deformazioni introdotte da ogni transistore sono neutralizzate da quelle dell'altro.

Ign. - Insomma, questo push-pull classe *B*, rassomiglia ad un « punching ball » che due boxeurs utilizzano simultaneamente per il loro allenamento: posti ai due lati opposti assestano colpi che lo fanno alternativamente deviare verso destra e verso sinistra.

Cur. - E' proprio così. E loro due gli imprimono una ampiezza d'oscillazione molto più forte di quella che saprebbe fare un solo boxeur.

Ign. - Infatti, il punto di funzionamento essendo situato presso una estremità della retta di carico, noi disponiamo per il segnale

d'entrata di una escursione due volte maggiore che nel caso della classe *A*, ove il punto di funzionamento è al mezzo della retta di carico.

Cur. - La classe *B*, voi lo vedete, ammette delle ampiezze doppie

Fig. 101 - Push-pull in controfase a trasformatore. I transistori sono montati in *E.C.*

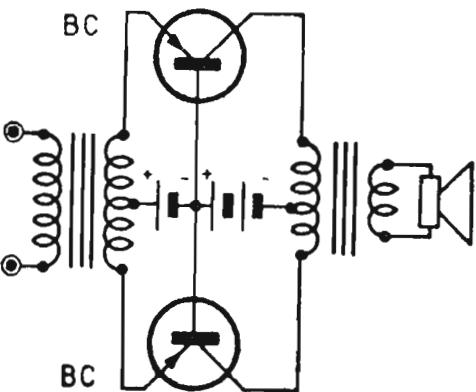
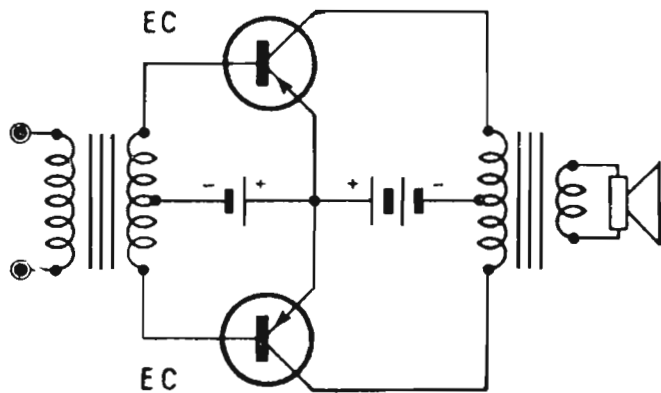
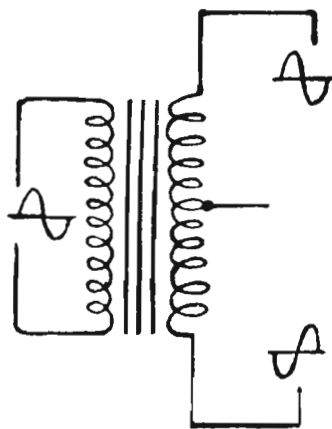



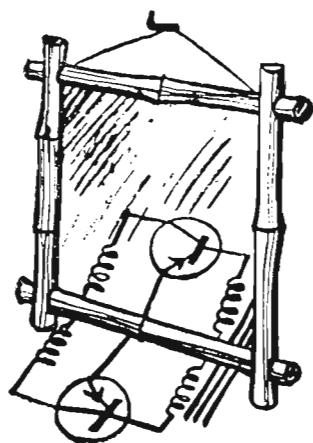
Fig. 102 - Sempre con controfase a trasformatore, i transistori sono qui in *B, C.*

di quelle della classe *A*. Il consumo, molto esiguo in assenza di modulazione, cresce in proporzione dell'ampiezza dei segnali. E, non ve l'ho ancora rivelato, la classe *B* permette di raggiungere arditamente i limiti imposti dall'iperbole di potenza massima.

Ign. - Certamente E senza pericolo per il transistore. Perchè non è che per qualche istante che la potenza erogata supererà questo limite. A riposo e per delle ampiezze medie, essa ne sarà inferiore. Per le alternanze negative del segnale, la potenza sarà quasi nulla. Per contro, vi è un'altra caratteristica del transistore, indicata nelle istruzioni dei fabbricanti, della quale occorre qui tenerne conto: il valore limite della corrente di collettore (I_c max) non deve essere superato.

Ign. - Vi prometto di non trasgredire mai questa norma. Forte di questa premessa, voi potete quindi, senza timore, iniziarmi a tutti i misteri del push-pull a transistori.

IL REGNO DELLA SIMMETRIA

Cur. - Anzitutto, sappiate Ignoto, che tutti gli schemi che noi esamineremo, si applicano sia al regime di classe *B* che al funzionamento di classe *A*. Differisce solo il valore della polarizzazione. Il circui-

to più frequentemente usato è quello in emettitore comune, che procura il massimo guadagno. Quando si voglia, però ridurre al minimo le distorsioni, converrà preferire il circuito a base comune. Infine se la resistenza d'entrata sarà elevata, e quella d'uscita piccola...

Ign. - ... si adotterà il circuito a collettore comune. Non ne dubitavo. In quanto allo sfasamento, penso che lo si otterrà facilmente mediante un trasformatore a presa mediana al secondario. Parimenti una presa al primario del trasformatore d'uscita dovrà permettere di applicare la tensione appropriata all'uscita.

Cur. - Infatti. Ed ecco gli schemi dei due circuiti push-pull: il primo emettitore comune, ed il secondo a base comune (fig. 101 e 102). Ne apprezzerete certamente la bella simmetria.

Ign. - E' proprio necessario, come l'avete disegnato, utilizzare pile per la polarizzazione?

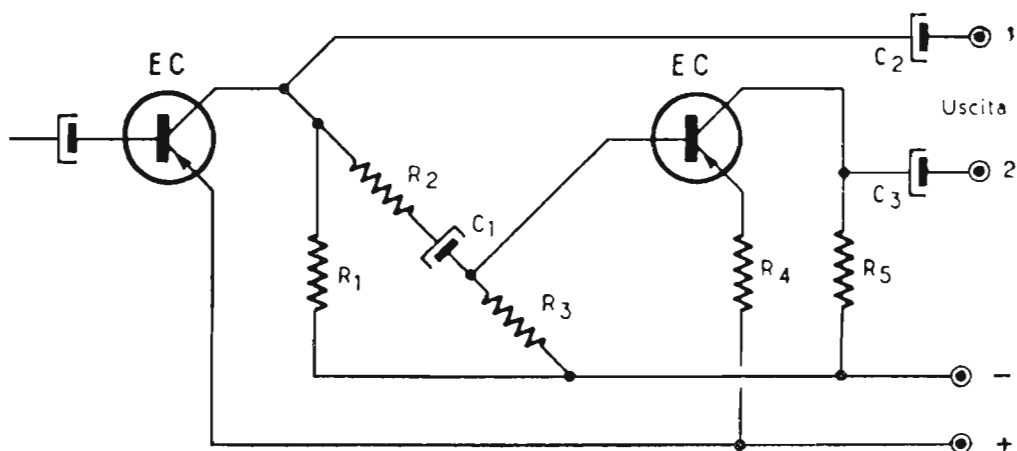



Fig. 103 - Controfase a transistori montati in *E.C.* con un guadagno ridotto all'unità.

Cur. - No. Questa è assicurata secondo i classici sistemi, mediante una resistenza in serie o un divisore di tensione collegato alla pila unica. Non ho mostrato questi circuiti (che voi ormai conoscete molto bene) per non compromettere la chiarezza dello schema.

MILLE E UNO SFASATORI

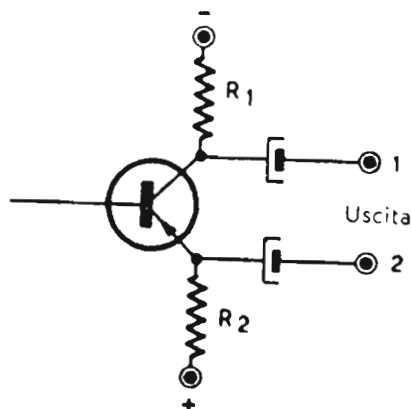
Ign. - Negli amplificatori a valvole si riesce ad ottenere lo sfasamento di 180° delle tensioni per il push-pull, facendo a meno del costoso ed ingombrante trasformatore. Penso che sarà ugualmente possibile coi transistori.

Cur. - Naturalmente. Voi sapete che nel circuito *E.C.* la tensione d'uscita è in opposizione di fase con quella d'entrata. Si possono quindi montare due stadi successivi a *E.C.* Le loro tensioni d'uscita saranno in opposizione di fase.

Ign. - E' ben bizzarro il vostro schema!... Il collegamento fra i due transistori non ha affatto l'aria ortodossa.

Cur. - Le resistenze R_2 e R_3 in serie col condensatore di collegamento C_1, costituiscono un divisore di tensioni destinato a trasmette-

tere al secondo transistore solamente una frazione della tensione che il primo fa apparire sulla sua resistenza di carico R_1. Inoltre voi constatate la presenza di una resistenza di controreazione R_4 nel circuito dell'emettitore del secondo transistore.

Fig. 104 - Invertitore di fase costituito da un transistore avente delle resistenze di carico sia nel circuito dell'emettitore che in quello del collettore.

Ign. - Poveretto! Voi riducete così il suo guadagno in due modi.

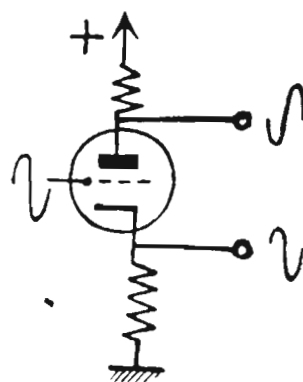
Cur. - E' proprio ciò che occorre. Perchè, al fine di equilibrare le due tensioni d'uscita, il guadagno del secondo transistore deve essere uguale a 1. Esso non deve nè amplificare, nè attenuare.

Ign. - Il suo compito è quindi strettamente di inversore di fase?

Cur. - E' effettivamente tutto ciò che gli si domanda. Vi è però un altro mezzo per ottenere le due tensioni in controfase, mediante un solo transistore. Consiste nell'impiegare un circuito misto E.C.-C.C. ponendo delle resistenze di carico R_1 e R_2 sia nel circuito di collettore, che in quelle dell'emettitore. Il segnale all'uscita 1, sarà in controfase nei rispetti di quello all'entrata, mentre all'uscita 2 esso sarà in fase.

Ign. - Ma è la replica fedele dello sfasatore « catodyna » a valvole, ove delle resistenze di carico sono intercalate in serie con l'anodo ed il catodo!

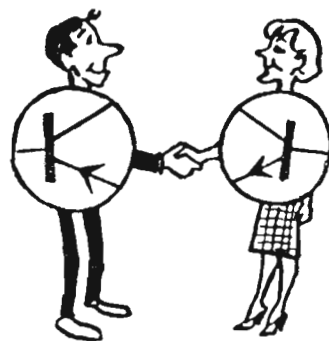
Cur. - L'avete subito riconosciuto, anche sotto il suo aspetto transistorizzato.

Ign. - Tutti questi circuiti che mi avete presentato, sono per me delle vecchie conoscenze poichè gli stessi sfasatori esistono negli amplificatori a tubi elettronici.

IL PUSH-PULL MIRACOLOSO

Cur. - Per contro, coi tubi, voi non potete realizzare un push-pull senza invertitore di fase.

Ign. - Mi rifiuto di credere che, a meno di un miracolo, ciò sia invece possibile coi transistori.

Cur. - Tale è invece la verità. Ed il miracolo è ancora la simmetria complementare dei transistori dei tipi *P-N-P* e *N-P-N*. Analizzate attentamente questo schema ove ne ho montati due in *E.C.*

Ign. - Procediamo secondo il metodo abituale... Ammettiamo che

una prima alternanza del segnale d'entrata renda le due basi più negative. In questo caso, il *P-N-P* amplificherà il segnale. Per contro il *N-P-N* resterà bloccato. All'alternanza successiva, che renderà le basi più positive, sarà il *P-N-P* a restare bloccato mentre il collettore *N-P-N* lascerà passare una corrente di collettore. Magnifico! Ingegnoso!

Cur. - Moderate il vostro entusiasmo, caro amico. Questo circuito necessita l'impiego di due pile (o almeno di una pila con presa intermedia), ciò che complica un po' le cose. Del pari è il caso del circuito basato sullo stesso principio di simmetria complementare, ma con transistori in *B.C.*

Ign. - Esatto. Deve funzionare bene come il precedente. Qui, il *P-N-P* reagisce alle alternanze positive applicate al mio emettitore, ed il *N-P-N* agisce nelle alternanze negative. Ma temo che non sia tanto facile utilizzare queste due pile, per l'alimentazione di altri transistori che possono far parte dello stesso circuito.

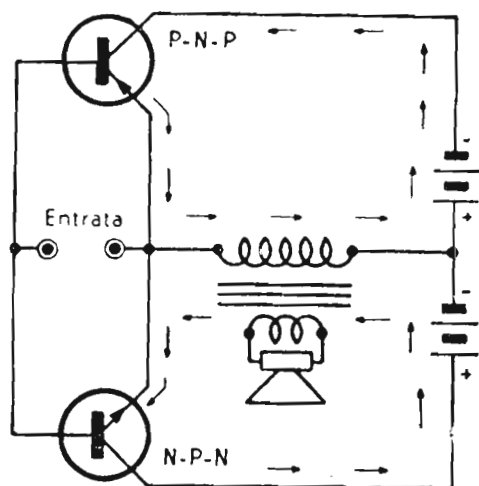



Fig. 105 - Push-pull senza controfase, utilizzante dei transistori *P-N-P* e *N-P-N*, montati in *E, C.*

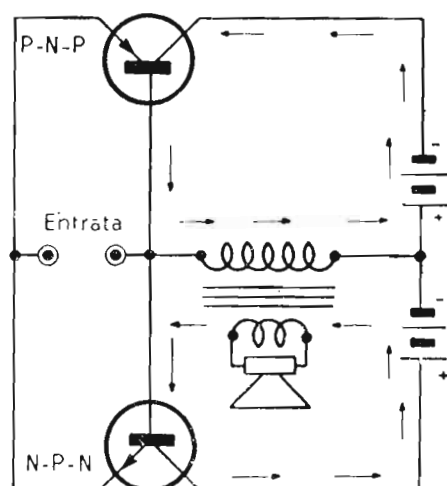



Fig. 106 - Ancora un push-pull senza controfase, ma con montaggio in *B, C.*

Posso ora chiedervi un favore? Vorrei montare un amplificatore a transistori per il mio fonografo portatile. Mi potreste disegnare uno schema pratico dello stadio d'uscita? Vorrei avere un buon push-pull, classe *B*, di potenza sufficiente per far ballare il nostro gruppo di amici.

Cur. - Ecco lo schema che mi avete chiesto, Ignoto. Vi sembra chiaro in tutto?

Ign. - A prima vista tutto sembra classico. Controfase a trasformatore... Controreazione in parallelo su ogni transistore, mediante i gruppi R_1-C_1 e R_2-C_2 di resistenze e condensatori in serie, fra collettore e base. Polarizzazione determinata dal divisore di tensione R_3-R_4... Stabilizzazione mediante la resistenza R_5 onde compensare gli effetti di temperatura; la resistenza è disaccoppiata dal condensatore C_3... Tutto ciò è ormai per me regolare. Però, qual'è il compito della resistenza R_6, disaccoppiata del condensatore C_4?

Cur. - Tenuto conto delle forti variazioni di erogazione della sorgente che provvede al funzionamento dei transistori di potenza in classe *B*, è preferibile disaccoppiare questa sorgente, per evitare delle reazioni su altri circuiti. Tale è il compito di R_6 e di C_4, che al

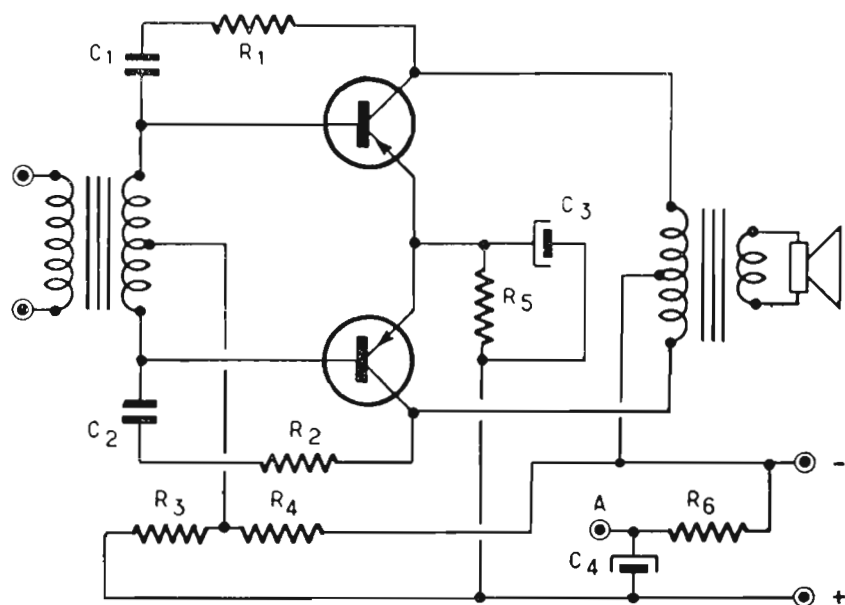
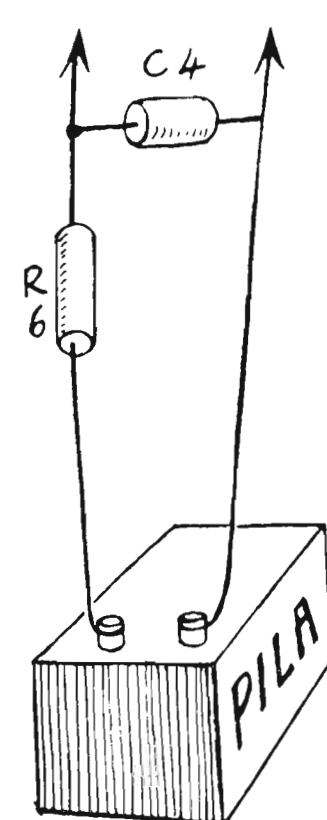



Fig. 107 - Schema pratico di uno stadio in push-pull con controreazione, compensazione di temperatura, ed alimentazione disaccoppiata.

punto *A*, procurano la corrente agli stadi che precedono il push-pull d'uscita. Siete soddisfatto?

Ign. - Sì. Ed ho fretta di mettermi al lavoro. Vi faccio perciò la mia riverenza.

DODICESIMA CONVERSAZIONE

L'analisi dettagliata dell'amplificazione a bassa frequenza, che è stata l'oggetto delle due conversazioni precedenti, faciliterà grandemente il compito di Curioso. Egli illustrerà ora a Ignoto, i metodi di amplificazione in alta frequenza. Gli mostrerà la rassomiglianza dei circuiti corrispondenti in quelli a tubi elettronici, ed in ciò che ne differiscono. Infine esaminerà i dispositivi di controllo automatico del guadagno (CAV) impiegati negli amplificatori a media frequenza a transistori.

SOMMARIO: Frequenza di taglio — Collegamento per circuiti accordati — Effetto dello smorzamento — Stadi in AF e MF — Capacità collettore-base — Neutrodina — Regolatore automatico (CAV) — Variazioni delle capacità e resistenze interne — CAV rinforzato.

NEL REGNO DELL'A. F.

IL DITO NELL'INGRANAGGIO

Ignoto. - Voi mi vedete, Curioso, fiero ed entusiasta ad un tempo. Fiero della buona riuscita del mio primo montaggio a transistori, ed entusiasta di avere nel mio fonografo a valigia, questo minuscolo amplificatore che, con un appetito più che modico, mi procura una audizione potente e pura.

Curioso. - Sono molto contento di vedere con quale successo voi avete tradotto in pratica le cognizioni che vi ho esposto. Eccovi quindi perfettamente soddisfatto.

Ign. - A dire il vero, non interamente. Perchè avrei voluto utilizzare il mio amplificatore non solamente col pick-up, ma anche come parte BF di un radioricevitore. Ora, non so come realizzare gli stadi che precedono la BF.

Cur. - Ed ecco come, dopo aver messo il mio dito nell'ingranaggio, mi vedo costretto ad intrattenervi sugli stadi ad alta e media frequenza pure, ovviamente, sul cambiamento di frequenza e la rivelazione. Poichè un ricevitore a transistori ha sensibilmente la stessa anatomia di un ricevitore a valvole. Incominciamo quindi dall'amplificazone ad alta frequenza.

I TRANSISTORI IN A.F.

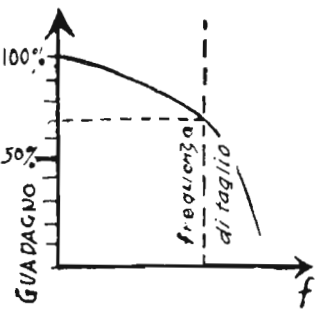
Ign. - So che questo è il punto debole dei transistori, poichè il loro guadagno, voi me l'avete detto, diminuisce con la frequenza.

Cur. - Esatto. Ed i fabbricanti indicano, nelle loro caratteristiche il valore della *frequenza di taglio.* E' la frequenza alla quale il guadagno in intensità e la pendenza cadono al 70% del valore che essi hanno in BF. Ma ciò non impedisce affatto d'utilizzare questi transi-

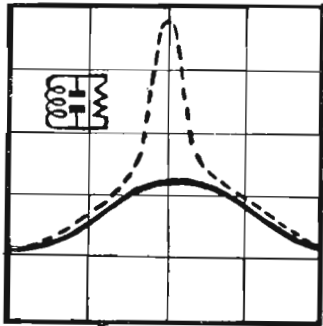
stori a frequenze molto più elevate, rassegnandosi ad una certa riduzione di guadagno. Il limite della frequenza utilizzabile è senza posa arretrato, grazie ai progressi della tecnologia. Ed attualmente, l'amplificazione di correnti a parecchie centinaia di megahertz, corrispondenti alle onde metriche utilizzate per la modulazione di frequenza, non presenta alcuna incognita.

Ign. - Dove sono dunque le difficoltà? Penso che non rimanga che adottare per i transistori, gli stessi circuiti dei tubi elettronici.

Cur. - Non lo si potrebbe fare senza tener conto dei valori relativamente bassi delle resistenze d'uscita e soprattutto d'entrata dei transistori.

Ign. - E perchè sono qui, più fastidiosi che in BF? Suppongo che sia sufficiente utilizzare, nei circuiti di collegamento, dei trasformatori riduttori, di rapporto appropriato, per realizzare l'adattamento delle impedenze, proprio come l'abbiamo visto fare nel campo della BF.

DOPPIO OBIETTIVO

Cur. - Voi dimenticate, Ignoto, che l'amplificazione ad alta frequenza, ha per obbiettivo non solamente di rinforzare i segnali deboli captati dall'antenna, ma anche di operarne la selezione, separando il buon grano dall'oglio. In altre parole, sia in alta frequenza che in media frequenza esiste un doppio imperativo: amplificazione e selettività. I transistori si incaricano dell'amplificazione...

Ign. - ... ed i circuiti accordati che stabiliscono i collegamenti, assicurano la selettività.

Cur. - Proprio quello che volevo dire. Ora, prendete uno stadio,

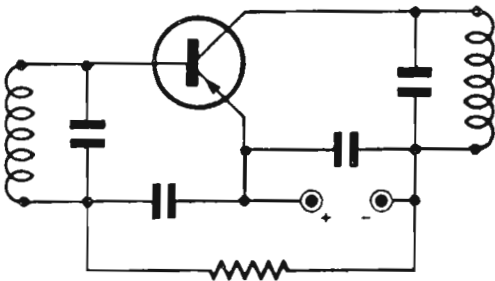



Fig. 108 - Circuiti accordati all'entrata ed all'uscita d'uno stadio in A.F. a transistori.

ove sia all'entrata che all'uscita, si trovi un circuito accordato. Quello d'entrata è collegato fra base ed emettitore, quindi in derivazione sulla resistenza d'entrata, che è del valore da 200 a 2.000 Ω. Questa resistenza lo smorzerà fortemente, appiattendo la sua curva di risonanza. Le cose si presentano meno disastrose per il circuito d'uscita collegato in derivazione alla resistenza collettore-emettitore, del valore di alcune decine di kiloohm. Ma anche qui, si farà sentire l'effetto dello smorzamento.

Ign. - Come fare allora per ottenere ad un tempo, l'adattamento delle impedenze, pur evitando uno smorzamento eccessivo? Mi sembra la favola della capra e del cavolo...

Cur. - Si riesce a conciliarli, giuocando per ogni circuito acco-

dato sul rapporto fra l'autoinduzione e la sua capacità, e collegando all'entrata ed all'uscita non la totalità degli avvolgimenti, ma solamente una parte delle spire, in modo da ridurre l'effetto dello smorzamento.

E, beninteso, ci si sforza di equilibrare le impedenze mediante un appropriato rapporto dei trasformatori.

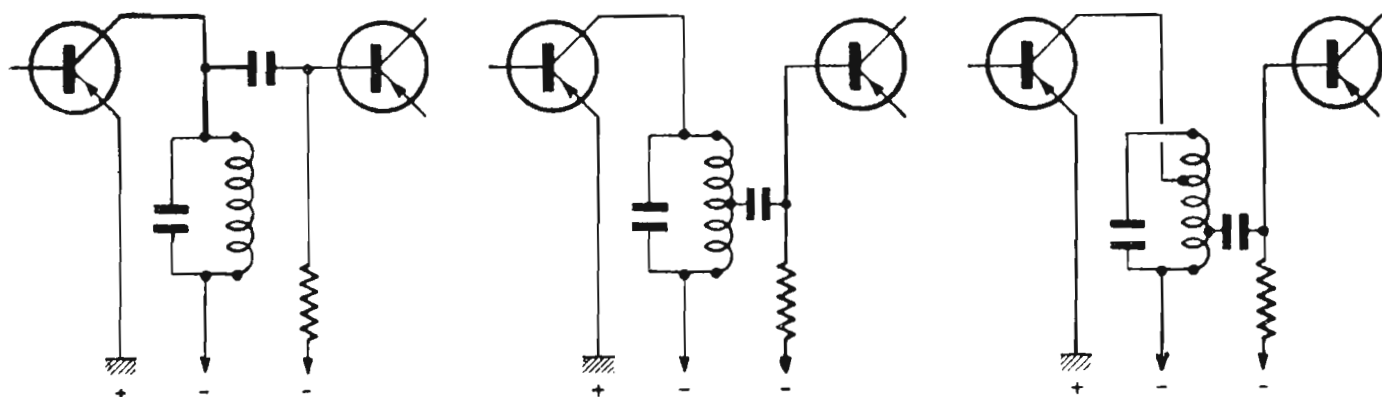



Fig. 109 - A sinistra: collegamento mediante « circuito tampone ». (In questo schema, come pure nei due che seguono, il polo positivo della sorgente è rappresentato dal simbolo di « massa »; ciò corrisponde alla pratica corrente nei circuiti equipaggiati con transistori *P-N-P* ove il polo positivo della pila è collegato alla massa dello chassis).

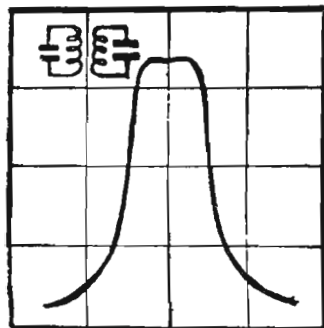
Fig. 110 - Al centro: collegamento mediante autotrasformatore abbassatore, a primario accordato. Qui, le impedenze sono meglio adattate che nello schema precedente.

Fig. 111 - A destra: per ridurre lo smorzamento dovuto alla resistenza d'uscita del transistore, questa è connessa solo su una frazione dell'avvolgimento del circuito accordato.

Ign. - Perchè il collegamento deve essere sempre effettuato mediante un trasformatore?

Cur. - Non tassativamente. Più sovente si impiega un semplice circuito-tampone. E' lo stesso tipo di collegamento per impedenza e capacità. Si può altresì ricorrere ad un autotrasformatore a primario accordato ed eventualmente collegato mediante una presa all'uscita del transistore precedente. Comunque, il sistema di collegamento, che assicura il massimo di selettività e di musicalità è il trasformatore con primario accordato o con primario e secondario entrambi accordati. Quest'ultima soluzione è sovente adottata negli stadi a media frequenza ove tali trasformatori, grazie ad un appropriato grado di accoppiamento fra i due avvolgimenti (accoppiamento critico) costituiscono degli eccellenti filtri di banda.

Ign. - Ciò significa che essi lasciano passare tutta la banda delle frequenze di modulazione, ma attenuano fortemente tutte le frequenze al di fuori di questa banda.

Cur. - Sì, Ignoto. Voi non avete dimenticato che questo è il miglior mezzo per assicurare la coesistenza pacifica fra la selettività e la fedeltà musicale.

IL PERICOLO INVISIBILE

Ign. - Posso quindi ritenere che se i costruttori di trasformatori fanno correttamente il loro lavoro, non dovrò incontrare alcuna difficoltà nella realizzazione dei miei stadi in alta e media frequenza.

Cur. - Desolato di versare una doccia fredda sul vostro beato ottimismo. Vi è, in realtà, nel transistore, un pericolo nascosto che vi guata e che vi può putroppo causare dei dispiaceri.

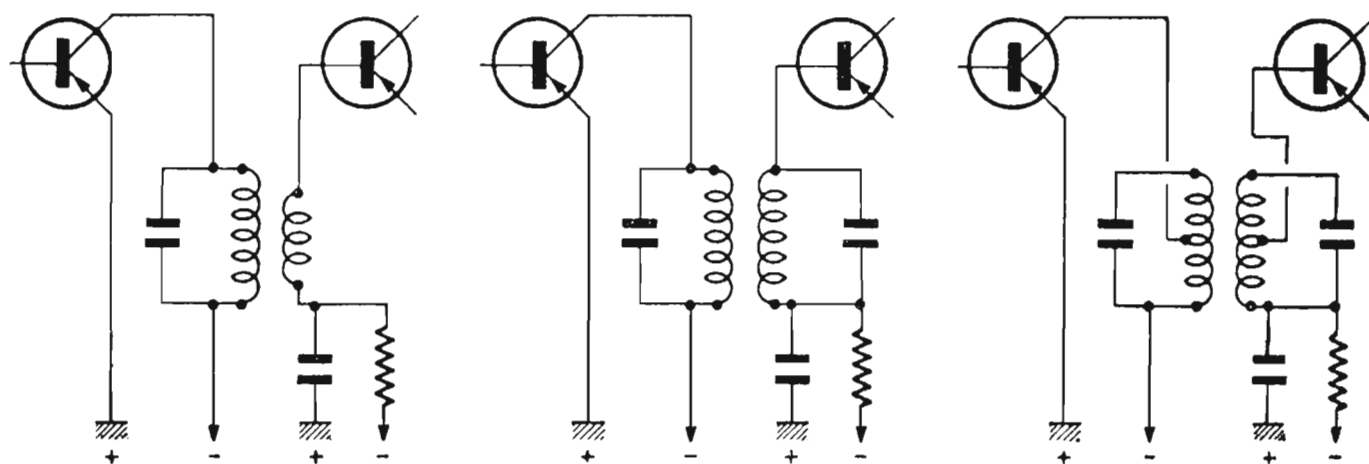
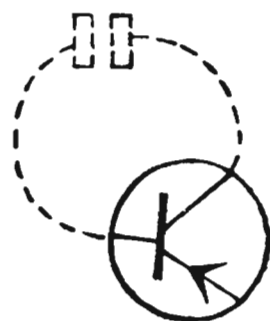



Fig. 112 - A sinistra: collegamento per trasformatore a primario accordato.

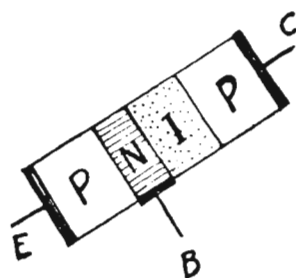
Fig. 113 - Al centro: Collegamento per trasformatore a primario e secondario entrambi accordati.

Fig. 114 - A destra: stesso circuito della figura precedente, ma dotato di una maggiore selettività. Grazie alle prese sugli avvolgimenti, l'uscita del primo transistore e l'entrata al secondo, smorzano meno i circuiti accordati.

Ign. - Forza allora! Preferisco combattere a viso aperto. Qual'è dunque questa nuova trappola?

Cur. - E' la capacità interna fra collettore e base. Se voi avete sia all'entrata che all'uscita, dei circuiti accordati sulla stessa frequenza, questa capacità (che può essere dell'ordine di qualche decina di picofarad) è sufficiente per stabilire fra questi circuiti un collegamento tale di trasformare un pacifico transistore in una sorgente di oscillazioni in alta frequenza.

Ign. - Mi ricordo che per evitare tali inneschi, dovuti alla capacità fra anodo e griglia nelle valvole a triodo, si introduce fra questi due elettrodi una griglia schermo portata ad un potenziale fisso. Suppongo che si proceda nello stesso modo coi transistori.

Cur. - E' infatti così, che sono costruiti i transistori *P-N-I-P*, dei quali abbiamo già parlato. Lo strato di semiconduttore intrinseco *I* giuoca, in una certa misura, il ruolo di schermo, riducendo la capacità base-collettore. I tipi « *drift* » comportano ugualmente una zona di protezione fra collettore e base. Ma coi transistori ordinari, per prevenire la generazione di oscillazioni spontanee, si è ricorso ad un metodo che fu, verso il 1920 proposto dall'americano Hazeltine per i circuiti in A.F. a triodi, prima dell'invenzione del tetrodo, che rappresen-

tò la soluzione definitiva del problema. Tale metodo, consiste a neutralizzare l'azione della capacità parassita, applicando all'elettrodo di controllo, delle tensioni della stessa ampiezza ma di fase opposta. Il circuito « *neutrodina* » coi triodi, impiegava dunque un piccolo condensatore che trasmetteva alla griglia una frazione delle tensioni amplificate, prelevate in opposizione di fase.

Ign. - E' a mio parere, una specie di controreazione che si fa così in AF. E per i transistori, la si deve applicare alla base. Ma come fare perchè la condizione d'opposizione di fase sia rispettata? Si deve ricorrere ad uno stadio invertitore di fase?

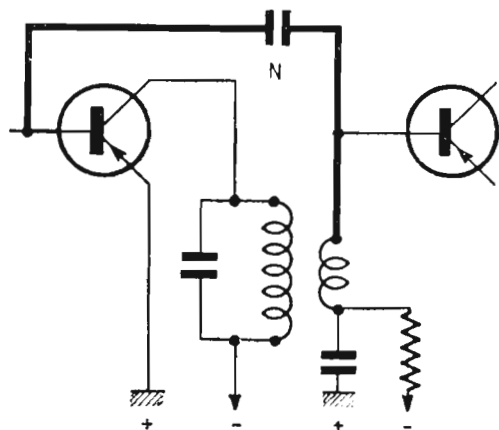
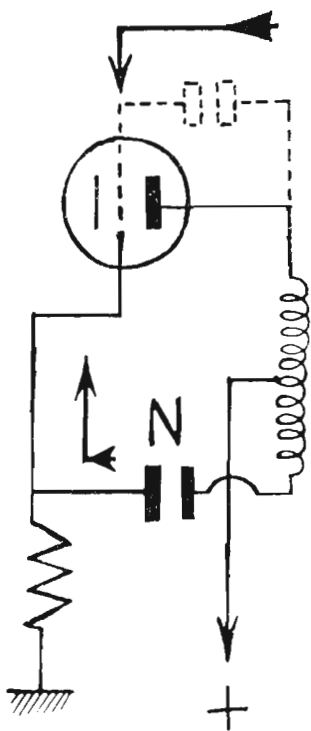



Fig. 115 - Il condensatore *N* serve a neutralizzare l'azione della capacità interna collettore-base. In alcuni circuiti, una resistenza è posta in serie con questo condensatore: la sua utilità è però sovente incerta.

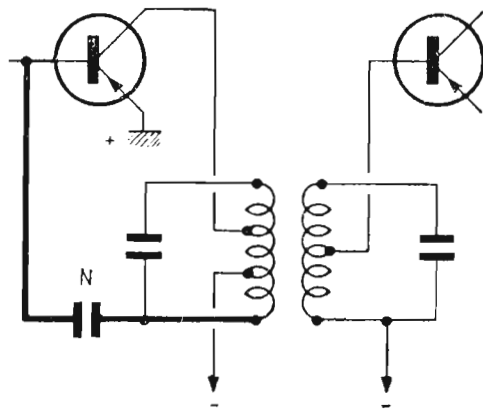
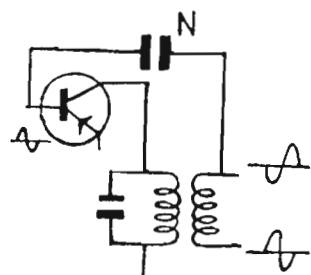
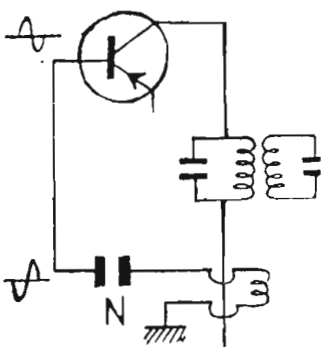



Fig. 116 - Circuito neutrodina preconizzato nel caso di collegamento per trasformatore a primario e secondario accordati.

Cur. - Perchè cercare tali complicazioni? Vi è sempre mezzo di trovare un punto di fase opposta a quella delle tensioni sul collettore... Nel caso di un trasformatore a secondario non accordato una delle estremità di detto secondario costituisce il punto in questione.

Ign. - Lo si collega quindi puramente e semplicemente alla base, mediante un condensatore *N*, di valore tale, che le tensioni siano della stessa ampiezza di quelle passanti attraverso la capacità collettore-base. Ma perchè non applicare questo stesso sistema nel caso dei trasformatori il cui secondario è anch'esso accordato? Non vi si trovano ugualmente delle tensioni in opposizione di fase ad una delle estremità, ed in fase all'altra?

Cur. - No, purtroppo! Perchè qui, le tensioni sono sfasate soltanto di un quarto di periodo, in anticipo ad una estremità, ed in ritardo all'altra. Ciò complica un poco le cose. Si può allora per avere la tensione di neutralizzazione, utilizzare un piccolo avvolgimento ausiliario. E' però più semplice praticare sul primario, una presa per il collegamento al negativo della sorgente. Allora, l'estremità di questo avvolgimento, che, nei rispetti di questa presa si trova dall'altro lato della parte collegata al collettore avrà delle tensioni opposte in fase a quelle del collettore. Non vi rimane che prelevare queste tensioni e, tramite un condensatore *N*, riportarle sulla base.

Ign. - Ma si è sempre costretti a neutrodinare gli stadi a AF e MF?

Cur. - No. Sovente, lo smorzamento, dovuto alle basse resistenze dei transistori è sufficiente per sopprimere ogni velleità di inneschi spontanei.

E coi *P-N-I-P* ed i « drift » la neutralizzazione diviene inutile... Comunque, tenete presente, Ignoto, che se non li ho fatti figurare negli schemi, al fine di renderli più semplici e chiari, tutti i dispositivi di compensazione degli effetti di temperatura (controreazione per resistenza disaccoppiata nell'emettitore) e di stabilizzazione della polarizzazione di base sono parimenti impiegati in AF e MF.

REGOLAZIONE AUTOMATICA

Ign. - E' possibile coi transistori, realizzare il controllo automatico del guadagno (CAV) in funzione dell'intensità del segnale ricevuto? Voglio parlare del regolatore anti-fading, anche se esso serve a rimediare a tutte le fluttuazioni del campo alla ricezione, siano es-

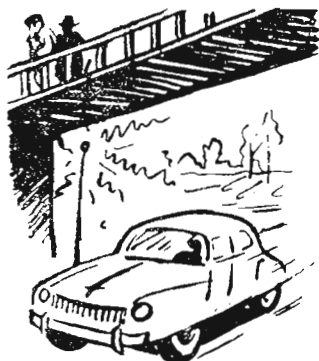
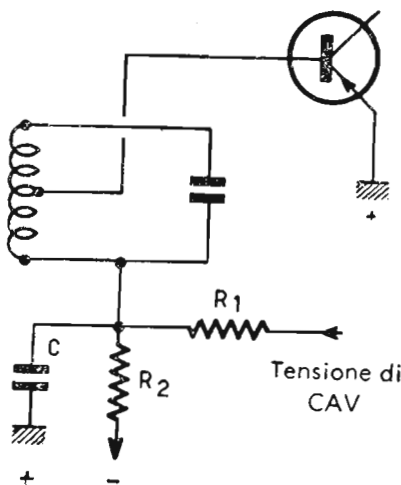
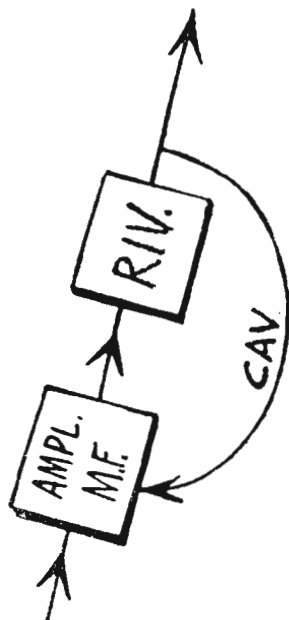



Fig. 117 - Stadio amplificatore in A.F. o M.F. sottoposto all'azione della tensione di controllo del C.A.V.

se dovute al « fading » vero e proprio, ovvero al passaggio sotto un ponte metallico di un ricevitore installato in un'automobile.

Cur. - Il CAV è nei circuiti a transistori, realizzato secondo lo stesso principio adottato nei ricevitori a valvole. Voi sapete che il guadagno in potenza d'un transistore dipende dalla sua pendenza che, dal canto suo, varia con la corrente dell'emettitore. Per conseguenza, modificando la polarizzazione della base, si può modificare il guadagno. Se si tratta, come si verifica più comunemente, di un transistore del tipo *P-N-P*, si riduce la corrente dell'emettitore, e quindi il guadagno, rendendo la base meno negativa.

Ign. - E, lo indovino, si utilizza a questo scopo, una tensione prelevata dopo la rivelazione e livellata mediante una resistenza disaccoppiata da una capacità.

Cur. - Esatto. Però occorre non perdere di vista che il comando di un transistore necessità più che d'una tensione: della potenza. Perciò si è sovente indotti a prelevare la tensione di regolazione, dopo aver amplificato la componente continua del segnale rivelato. Vedremo più avanti, che ciò non ha nulla di complicato.

Ign. - In tale attesa, vedo lo stadio AF o MF asservito al CAV, sotto una formazione assai semplice. Questa tensione che deve essere tanto più positiva, quanto più forte è il segnale, è applicata alla base pel tramite di una resistenza R_1, attraverso il circuito di entrata. Un'altra resistenza R_2, connessa al negativo della sorgente, costituisce con R_1, un divisore di tensione. Il potenziale medio della base varierà pertanto così: per dei segnali deboli esso sarà più negativo, ciò che aumenterà il guadagno; esso sarà meno negativo per dei segnali forti, ciò che darà un guadagno più ridotto. E così tutto andrà per il meglio!

UNA DIFFICOLTA' IMPREVISTA

Cur. - Una volta di più, mi vedo costretto a disilludervi: il vostro ottimismo non è poi così giustificato. Non dimenticate che nel transistore tutto è in equilibrio; ed ogni cambiamento di una delle grandezze sconvolge tutte le altre. Si verifica che le capacità d'entrata e d'uscita variano contemporaneamente e nel medesimo senso dell'intensità della corrente dell'emettitore.

Ign. - Di modo che la tensione di regolazione provoca, mediante le sue variazioni, il disaccordo dei circuiti oscillanti collegati in derivazione sull'entrata e l'uscita del transistore.

Cur. - Ma certamente, Ignoto. E gli inconvenienti non si limitano inoltre a questo. Poichè le resistenze d'entrata e d'uscita variano ugualmente in funzione della corrente dell'emettitore, ma in senso opposto alle loro variazioni.

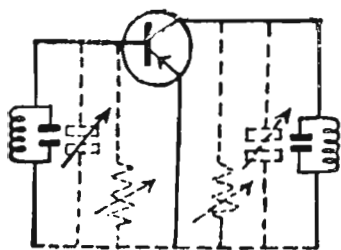
Ign. - Ma è poi tanto grave?
Tutt'al più, aumentando queste resistenze smorzeranno meno i circuiti accordati all'entrata ed all'uscita. Ed il ricevitore diverrà più selettivo...

Cur. - ... e perciò meno musicale, poichè la banda passante diverrà più stretta a detrimento delle note acute.

Ign. - Dal tempo che vi conosco, Curioso, ho ormai capito il vostro metodo che consiste nell'accumulare le difficoltà più gravi, per poi farle scomparire con un colpo di bacchetta magica. Siate gentile ora di dare questo colpo di bacchetta !

Cur. - A dire il vero, occorrerà che vi accontentiate di un compromesso, poichè non è tanto facile eliminare tutti gli inconvenienti che vi ho segnalati. A questo scopo, si può rinforzare l'azione del regolatore, agendo nello stesso tempo sullo smorzamento di un circuito accordato, in modo di accrescerlo, quando i segnali divengono più forti. Ecco qui uno schema molto ingegnoso che permette di farlo. Voi vi ritrovate l'identico procedimento di controllo del guadagno, transistore. Ma inoltre, voi constaterete la presenza insolita di un diodo fra una delle estremità d'un circuito d'entrata ed un'estremità della resistenza di carico R_5, nel circuito d'uscita. Provate ad analizzarne la funzione.

Ign. - Ebbene, ammettiamo che i segnali riceventi divengano più forti. La tensione applicata, attraverso R_1, alla base del secondo transistore, diviene allora meno negativa, e la sua corrente di emettitore diminuisce. La corrente di collettore diminuisce ugualmente. La cadu-

ta di tensione che essa determina nella R_5, diviene meno forte, di modo che il punto *A*, diviene meno negativo. Allora, la corrente che lascia passare il diodo *D* diviene più intensa, poichè in tal modo, la differenza di potenziale che gli è applicata diviene più elevata. E' tutto...

Cur. - No; non è tutto. Poichè il circuito, del quale fa parte il diodo (e che ho tracciato con linea marcata), è) voi lo vedete bene,

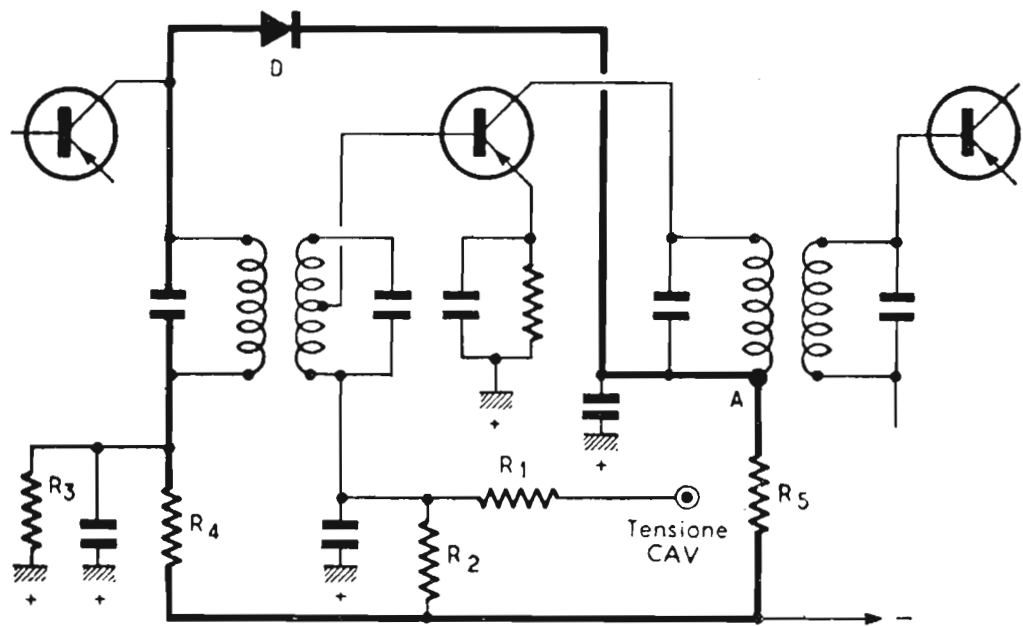



Fig. 118 - Dispositivo di C.A.V. rinforzato, ove il diodo D determina uno smorzamento variabile del primo circuito accordato.

collegato in derivazione sul nostro primo circuito accordato. Il fatto che la corrente vi divenga più forte, significa che la sua resistenza è divenuta meno elevata. Ciò significa ch'esso smorza maggiormente il circuito accordato, consumando maggiormente la sua energia.

Ign. - Ci sono! Cosicchè per i segnali più forti, quando le resistenze interne dei transistori aumentano voi avete introdotto artificialmente una resistenza che al contrario, diminuisce. E noi compensiamo così una delle variazioni con l'altra. Inoltre, l'accresciuto smorzamento del circuito, riduce il guadagno e rinforza l'azione del CAV.

Cur. - Caro Ignoto, ho l'impressione che ben presto, sarete voi che mi insegnerete la teoria e la pratica dei transistori...

TREDICESIMA CONVERSAZIONE

Ignoto conosce ora come i transistori permettono di amplificare i segnali in AF, in MF ed in BF.
Ma egli ignora il modo di passare da una di queste frequenze, all'altra.
Così Curioso gli va svelando qui i misteri della rivelazione e del cambiamento di frequenza.
Cammin facendo, egli passerà in rivista un certo numero di oscillatori a transistori.

SOMMARIO: Rivelazione per diodo — Soglia di rivelazione — Rivelazione per transistore — Rivelatore a reazione — Circuiti oscillatori — Cambiamento di frequenza con o senza oscillatore separato.

DALLA A.F. ALLA M.F. POI ALLA B.F.

LE ULTIME ZONE BIANCHE

Ignoto. - In un'epoca in cui la selenografia (1) non ha più segreti per noi, penso irresistibilmente a quelle carte che con le loro zone bianche di « terre sconosciute », facevano la delizia dei nostri nonni e lasciavano una grande latitudine all'immaginazione di Giulio Verne e dei suoi emuli.

Curioso. - Capisco benissimo a cosa voi volete arrivare. Nella catena degli stadi componenti un ricevitore, restano per voi due zone bianche: la rivelazione e il cambiamento di frequenza. La colmeremo più facilmente, in quanto nessuna trappola ci insidia in questo campo, e che praticamente, voi sapete già come avviene la rivelazione mediante un diodo.

Ign. - Effettivamente noi abbiamo già esaminato come il diodo raddrizza il segnale AF; dopo di che, le alternanze unilaterali, livellate mediante una capacità, creano una tensione BF su una resistenza di carico.

RIVELAZIONE = RADDRIZZAMENTO

Cur. - Ecco qua uno schema che non ha per voi nulla di misterioso. Noi utilizziamo un diodo a punta *D*, che raddrizza le correnti uscenti MF, e crea così, alle estremità della resistenza *P*, delle tensioni che l'azione del condensatore C_1 livella, per mettere in evidenza la loro componente BF. Se ne preleva una frazione più o meno grande, spostando il cursore del potenziometro *P* (regolazione dell'in-

---

(1) Geografia (se lo si può dire) della luna.

tensità sonora), e attraverso il condensatore elettrolitico (qui siamo in BF), vengono applicate alla base del primo transistore BF.

Ign. - A che serve la resistenza R_2?

Cur. - A evitare uno smorzamento eccessivo del trasformatore MF causato dalla resistenza d'entrata insufficiente del transistore BF. Notate ancora, Ignoto, che il diodo a punta non incomincia a lasciare

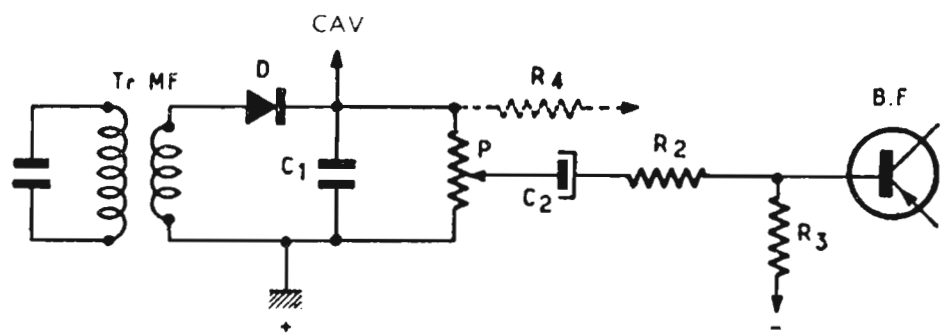



Fig. 119 - Circuito rivelatore per diodo inserito fra l'ultimo trasformatore M.F. ed il primo transistore B.F.

passare la corrente nel senso dovuto che quando le tensioni da raddrizzare oltrepassano un certo valore, che è la « soglia » della rivelazione.

Inoltre, poter rivelare dei segnali inferiori a questa soglia (che è dell'ordine 0,25 V) e non deformare quelli che pur sorpassandola, sono deboli, è preferibile polarizzare il diodo al valore della soglia, E' la ragione della presenza della resistenza R_4 che di valore molto

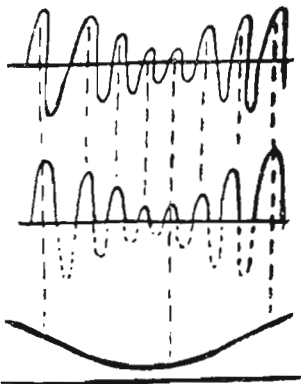
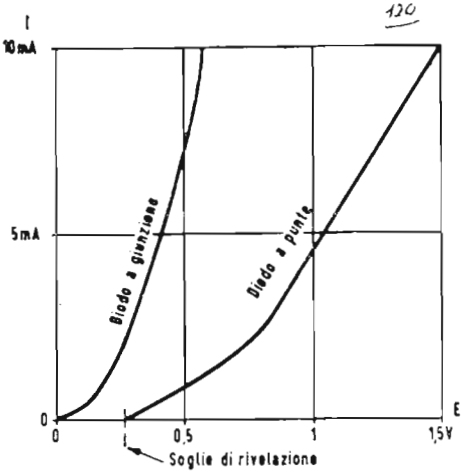
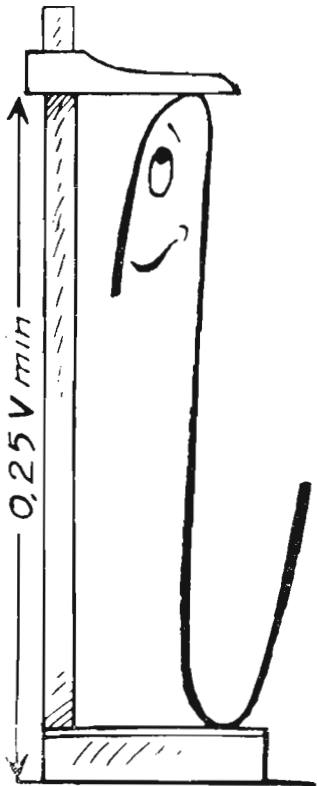



Fig. 120 - Curve mostranti la variazione della corrente che attraversa un diodo in funzione della tensione che gli è applicata.
Si noti come il diodo a punte non entra in funzione che a partire da una tensione dell'ordine di 0,25 V.

superiore a *P*, forma con *P* un divisore di tensione, rendendo il diodo conduttore, pure per dei segnali deboli.

Ign. - Vedo che voi prelevate la totalità della tensione rivelata, per il CAV.

Cur. - E non sono nemmeno sicuro che ciò sia sempre sufficiente per assicurare una buona regolazione. Comunque, prima di parlare del CAV, amplificato, lascio alla vostra analisi uno schema di rivelazione a diodo, più raffinato.

Ign. - Non mi fa paura. Paragonato al precedente, esso ne diffe-

risce per la cellula di filtraggio C_3 - R_7 - C_4, vero e proprio filtro passa-basso, destinato a eliminare ogni traccia della componente MF nella tensione che appare in *P*. D'altra parte, voi create la tensione di regolazione su una resistenza di carico distinta R_5, disaccoppiata da R_6 e C_5. La polarizzazione è assicurata grazie alla resistenza R_4. Insomma qui è stato meglio separato il circuito BF da quello del CAV. Vorrei tuttavia sapere come riuscite a realizzare il CAV amplificato.

Cur. - Molto semplicemente, rivelando, mediante un transistore, o per essere più precisi mediante la giunzione emettitore-base, che co-

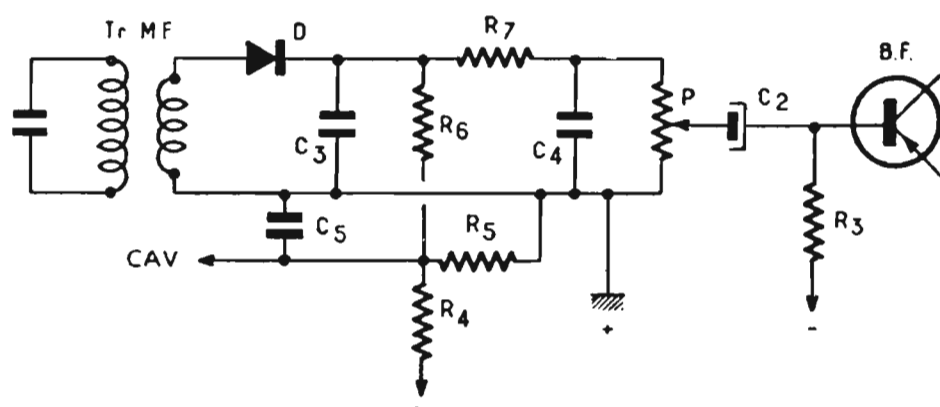
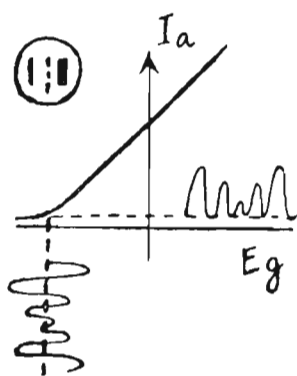



Fig. 121 - Schema di uno stadio rivelatore, ove la tensione di regolazione è sviluppata su una resistenza di carico distinta, e la corrente rivelata è livellata mediante una cellula a resistenza e capacità.

stituisce in effetti un diodo. La sua soglia è molto più bassa di quella dei diodi a punta, di modo che è sufficiente una bassissima polarizzazione negativa, assicurata dal divisore di tensione R_1 - R_2, per permettere la rivelazione dei segnali di piccola ampiezza. Notate bene questa polarizzazione non deve eccedere 0,1 V; in caso contrario, in luogo di rivelare, il transistore si metterà ad amplificare in MF, ciò che non desideriamo affatto... Non rispondendo che alle alternanze che rendono la base più negativa, il transistore non lascerà passare nel collettore che le correnti corrispondenti a queste alternanze.

Ign. - Ma è esattamente il funzionamento della rivelazione per curvatura della caratteristica anodica nel campo dei tubi!

Capisco benissimo, allora, ciò che accade. I nostri impulsi unilaterali della corrente di collettore, sviluppano nella resistenza di carico R_5, delle tensioni di BF amplificate grazie al guadagno del transistore. Filtrate da C_1 - R_4 - C_2, esse sono in seguito dosate dal potenziometro *P*, prima di proseguire il loro cammino negli stadi di BF.

Cur. - Esatto. Voi constaterete tra l'altro, la presenza di un'altra resistenza di carico R_6, che forma con R_5 un divisore di tensione per applicare, attraverso R_7, una conveniente polarizzazione alle basi dei transistori asserviti al CAV.

IL CONTRARIO DELLA CONTROREAZIONE

Ign. - E questa tensione di regolazione, lo vedo bene, è qui effettivamente amplificata. E poichè noi parliamo di rivelazione, vorrei do-

mandarvi se coi transistori, è possibile realizzare un rivelatore a reazione, questo dispositivo che mi ha sempre meravigliato per la straordinaria sensibilità.

Cur. - Beninteso. E' sufficiente a questo intento, di reiniettare nel circuito d'entrata, una parte dell'energia amplificata, che viene prelevata dal circuito d'uscita. Naturalmente, occorre che...

Ign. - ... le tensioni reiniettate siano in fase con quelle del cir-

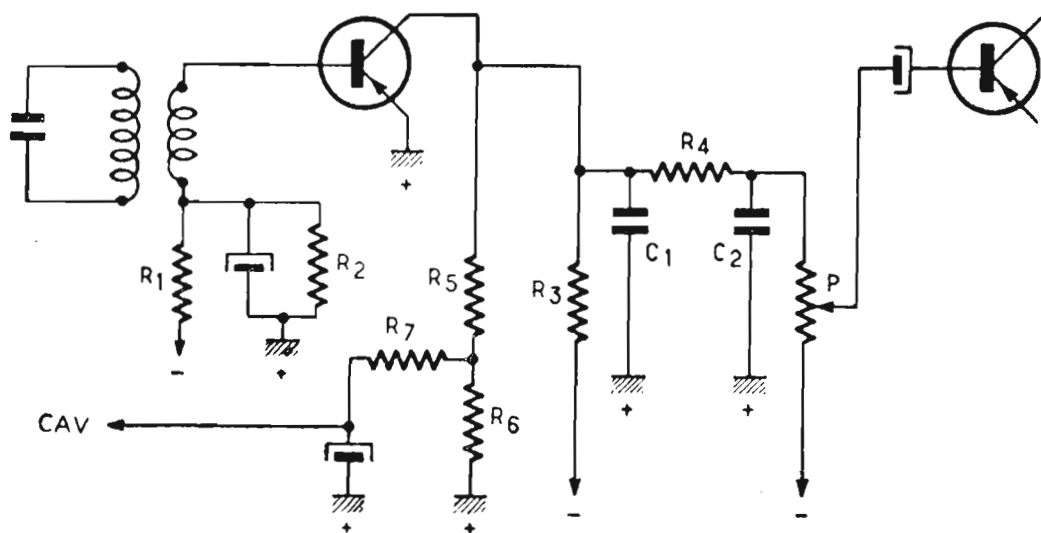



Fig. 122 - Rivelazione per transistore, procurante una tensione di C.A.V. amplificata.

cuito d'entrata. Altrimenti noi faremo della controreazione ed invece di accrescere il guadagno, lo ridurremmo.

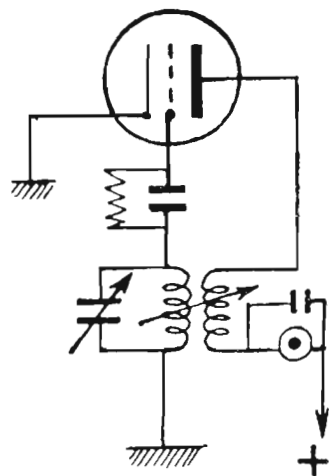
Cur. - Un'altra condizione deve essere rispettata: l'accoppiamento fra i circuiti d'entrata e d'uscita non deve superare un certo limite: in caso contrario...

Ign. - ... il nostro rivelatore a reazione si trasformerà in oscillatore ad AF e le sue emissioni intempestive faranno nascere dei fischi d'interferenza nei ricevitori del vicinato.

Cur. - Ciò si verifica, quando l'apporto di energia, dovuto alla reazione, è superiore alla frazione d'energia dissipata nel circuito d'entrata, a causa di perdite di varia natura.

Voi sapete, Ignoto, che un oscillatore in AF non è sempre una causa di discordia coi vicini. Usato correttamente, è proprio lui che permette di realizzare il cambiamento di frequenza.

Ign. - Sono contento di vedervi abbordare quest'ultima « terra incognita » della mia carta geografica. Suppongo che con l'adattabilità che li caratterizza, i transistori permetteranno di realizzare un gran numero di schemi d'oscillatori.

Cur. - Non vi sbagliate. E' possibile infatti, giuocare su parecchi fattori: all'entrata si può eccitare sia la base, che l'emettitore. Si può altresì accordare sia il circuito di base che quello di collettore. Infine, si può realizzare un oscillatore con un unico avvolgimento che serva ad un tempo all'accordo ed alla reazione.

Ign. - Se permettete, voglio tentare di combinarne uno molto semplice. Inserisco il circuito accordato in quello del collettore ed accoppio il suo avvolgimento L_1, con un altro L_2, eccitante, attraverso

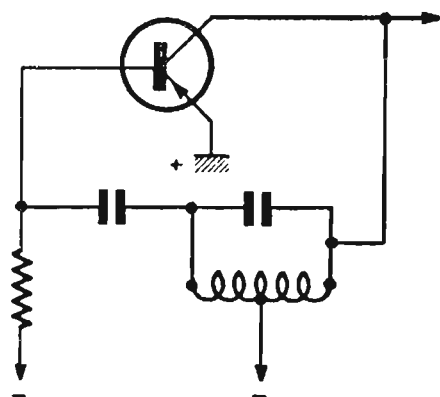
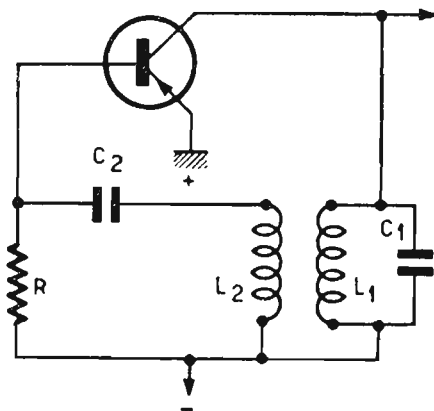



Fig. 123 - Qui sopra: oscillatore comportante un circuito accordato nel collettore ed un avvolgimento d'accoppiamento con la base, per la reiniezione dell'energia amplificata.

Fig. 124 - In alto a destra: nell'oscillatore Hartley, un solo avvolgimento a presa intermedia è sufficiente all'accordo ed alla reazione. Sostituendo la presa sulla bobina, mediante un « punto intermedio elettrico » realizzato con due condensatori in serie, si otterrà l'oscillatore Colpitts.

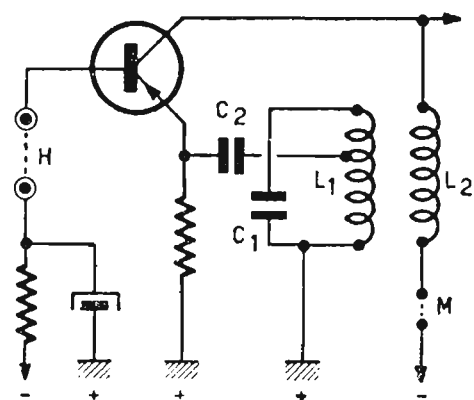
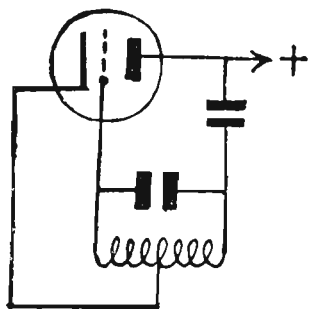
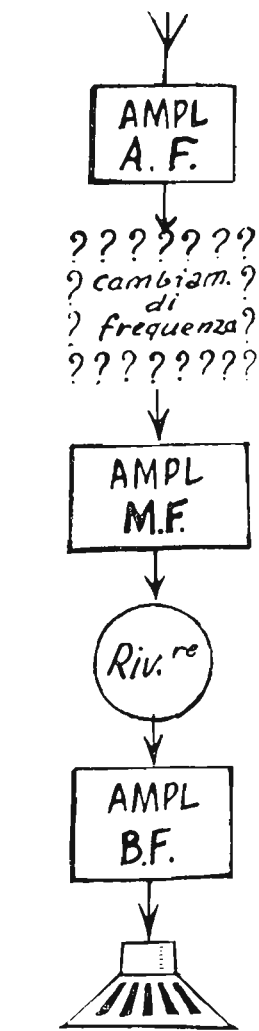



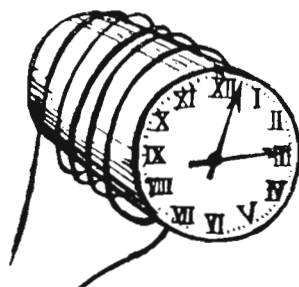
Fig. 125 - Qui a fianco: oscillatore del tipo più corrente, comportante un circuito accordato nell'emettitore, accoppiato con l'avvolgimento di reazione inserito nel circuito di collettore. Il significato delle lettere *H* e *M* illustrato nel testo.

C_2, la base del transistore, polarizzato mediante *R*. Credete che oscillerà il mio circuito?

Cur. - Senza alcun dubbio, se orienterete convenientemente il senso degli avvolgimenti.

Ign. - Come sapere a priori che questa condizione è soddisfatta?

Cur. - Tenere sempre presente il circuito Hartley, del quale ecco qui la variazione transistorizzata. Potete vedere che andando dal collettore verso la base, la corrente percorre le spire sempre nello stesso senso. Applicate ora questa stessa regola al circuito della figura 123, e se nella L_1 la corrente percorre le spire nel senso delle lancette dell'orologio, andando dal collettore al negativo, fate in modo che, nelle spire di L_2 la corrente giri nello stesso modo andando dal negativo verso la base.

Ign. - Ma se al posto della base noi eccitiamo l'emettitore, occorre senza alcun dubbio invertire il senso degli avvolgimenti.

Cur. - Beninteso. Osservate questo schema, in cui il circuito accordato L_1 - C_1 eccita l'emettitore attraverso C_2. Qui, la bobina di reazione, inserita nel circuito del collettore, deve essere orientata nel senso contrario dell'avvolgimento L_1, poichè le tensioni che si applicano all'emettitore sono di fase opposta a quelle applicate alla base.

TRIODI IN TUTTE LE SALSE

Ign. - Mi sembra di essere perfettamente in grado di tracciare una buona dozzina di schemi d'oscillatori. Ma se voi me ne parlate, è, ne sono sicuro, per abbordare il problema del cambiamento di frequenza. Ora, mi sento molto perplesso. Come fare un oscillatore-mescolatore con dei transistori, che non sono che dei triodi a cristallo?

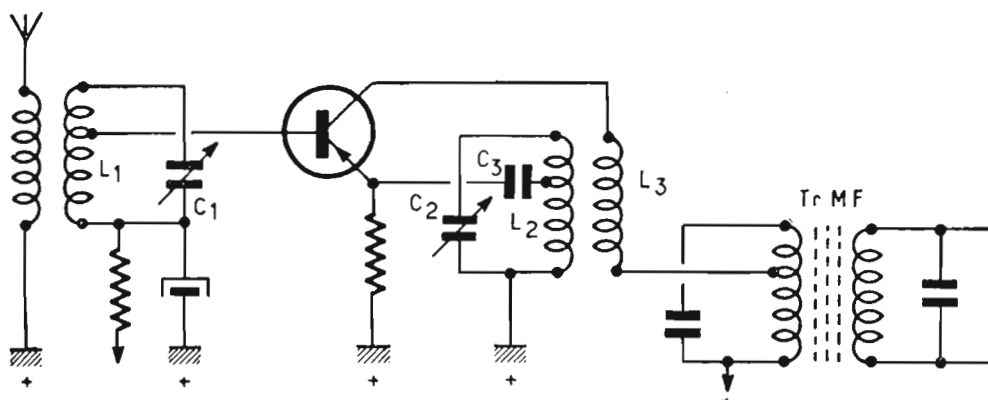



Fig. 126 - Circuito a cambiamento di frequenza direttamente derivato dall'oscillatore della figura precedente.

Non vi è proprio mezzo di fare degli esodi, degli eptodi e degli ottodi a semiconduttori?

Cur. - Sino ad oggi, non lo si è fatto. Forse si potranno realizzare dei semiconduttori a due elettrodi di controllo, agendo sulla corrente sia mediante il potenziale di base che pel tramite di un elettrodo il cui campo elettrico servirebbe a deviare i portatori di carica dal percorso diretto...

Ma, in attesa di ciò, ci si può accontentare dei nostri triodi. Le prime supereterodine non furono forse realizzate in un'epoca nella quale non si conosceva che il tubo a tre elettrodi?

Ign. - Ma come potreste, con lo stesso transistore, generare le oscillazioni locali, sovrapporle alla corrente ad AF d'antenna e rivelare il tutto, per fare apparire la componente a MF risultante dei battimenti?

Cur. - Molto semplicemente, Ignoto. Prendete l'oscillatore della

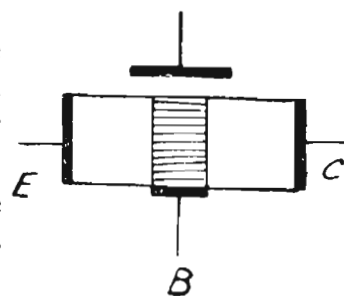



figura 125 ed inserite in *H*, il circuito accordato sul segnale d'antenna; poi inserite in *M* il primario di un trasformatore MF. Giungerete così allo schema della figura 126. Se il circuito C_2 - L_2 dell'oscillatore è accordato su una frequenza diversa da quella del segnale captato dall'antenna, del valore della MF, il cambiamento di frequenza si effettuerà senza alcuna difficoltà.

Ign. - Infatti, voi applicate il segnale alla base, generate l'oscil-

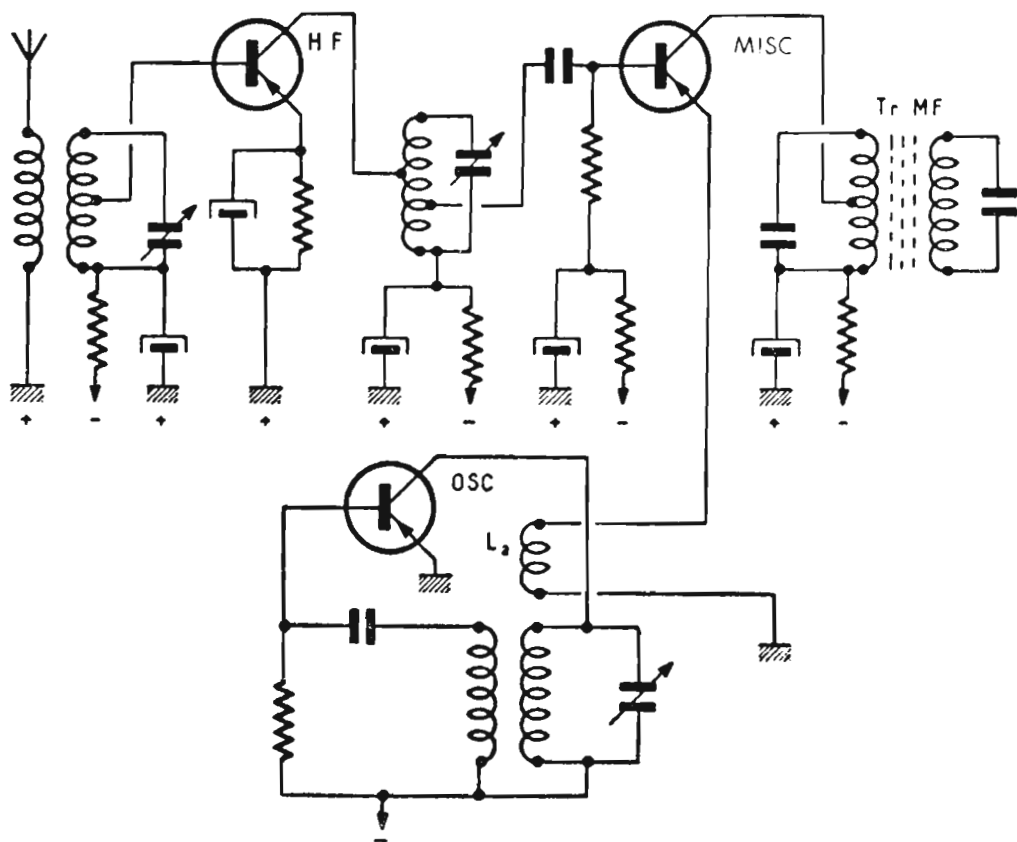



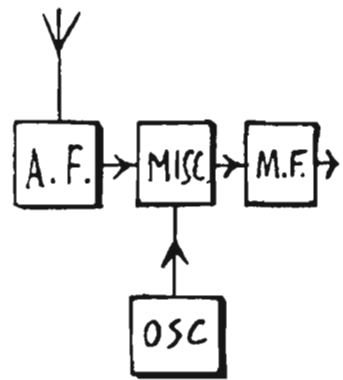
Fig. 127 - Preceduto da un amplificatore in A.F., lo stadio di cambiamento di frequenza-miscelatore, è servito da un oscillatore separato.

lazione fra emettitore e collettore, ed approfittate sicuramente della non-linearità della caratteristica del transistore, polarizzato convenientemente a questo scopo, per rivelare i battimenti.

Certo che questo modo di sfruttare un povero transistore, caricandolo di tanti compiti diversi, mi sembra ci debba riportare alla detestata epoca della schiavitù.

Cur. - Il transistore non ne risente per questo, alcun danno. Ma se voi proprio ci tenete a separare nettamente la funzione di oscillazione e mescolazione, e ciò può essere preferibile per la ricezione delle onde corte, voi potete ricorrere all'impiego di un oscillatore separato. A titolo d'esempio, vi presento lo schema di uno stadio preamplificatore in AF, seguito da un miscelatore con oscillatore separato. Come vedete, le oscillazioni sono applicate all'emettitore del me-

scolatore pel tramite di un avvolgimento L_8 accoppiato alle bobine dell'oscillatore.

Ign. - Questo mi sembra molto simpatico. E constato anche con gioia che non mi restano più zone bianche sulla carta del paese meraviglioso dei transistori.

QUATTORDICESIMA CONVERSAZIONE

In questa conversazione che termina il viaggio intrapreso dai nostri giovani amici nel bel paese dei transistori, si parla di treni. Quest'ultimo incontro permetterà a Curioso ed a Ignoto di applicare le cognizioni acquisite allo studio di schemi d'assieme. Dopo aver così fatto uso delle nozioni assimilate in precedenza, i nostri amici getteranno uno sguardo verso le prospettive meravigliose dell'avvenire, che si aprono dinnanzi ai triodi a cristallo.

SOMMARIO: Schema di un ricevitore completo — Antenna a ferrite — Applicazioni varie dei transistori — Convertitore di corrente continua — L'avvenire dei transistori.

VAGONI E TRENI

DIVERTIMENTO DEI GRANDI, TRANQUILLITA' DEI BAMBINI

Ignoto. - Non siate sorpreso, caro Curioso, di vedermi giuocare con un treno elettrico. Questo è destinato al mio piccolo cuginetto. E sto verificando il buon funzionamento dei telecomandi e degli scambi.

Curioso. - Sì. E' proprio ciò che dicono i padri, offrendo un treno elettrico ai loro figli, poichè non osano confessare quanto si divertono loro stessi... Ma voi avete da divertire il vostro cuginetto. Che assortimento di vagoni! Viaggiatori di tutte la classi, wagon-lit, wagon-

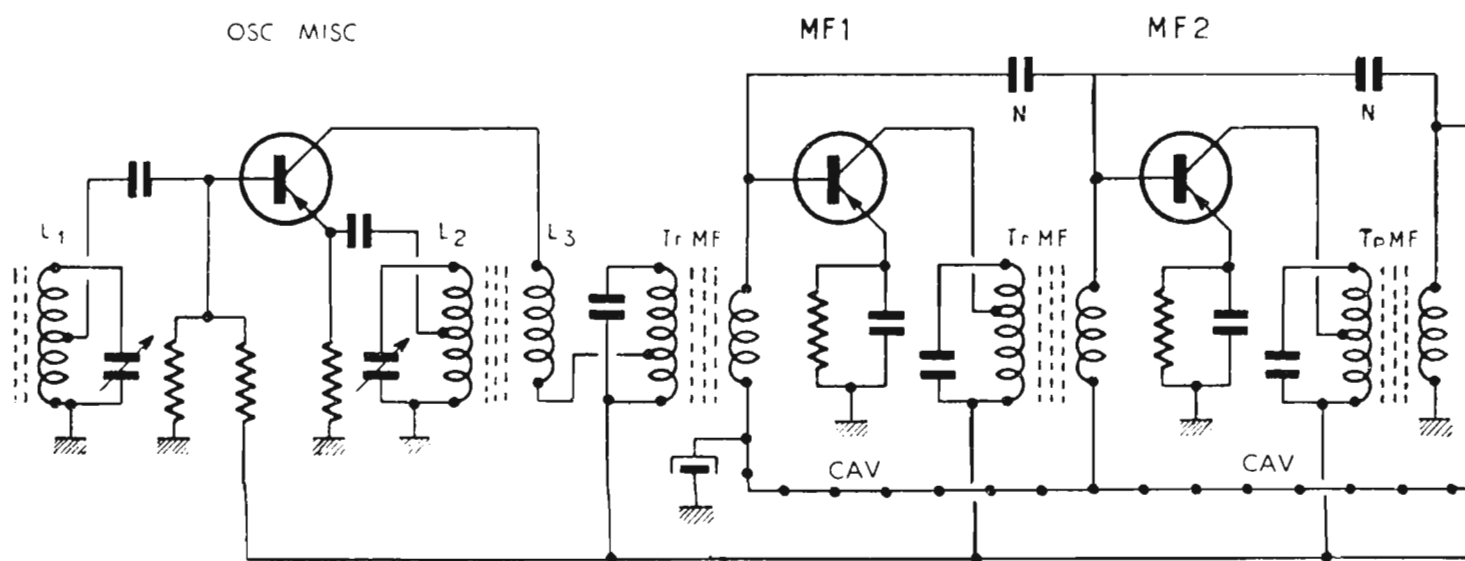



Fig. 128 - Schema tipico di un radioricevitore portatile a transistori, composto da elementi studiati in precedenza.

restaurant, vagoni frigoriferi, cisterne, piattaforme, ed altri ancora!

Ign. - Ciò permette di combinare all'infinito la composizione dei convogli.

Cur. - Analogamente a quanto i diversi circuiti a transistori che abbiamo studiato, permettono di comporre una infinità di ricevitori d'ogni genere. Sarebbe inutile volerli passare tutti in rivista. Ma se volete, a titolo d'esempio, noi imbastiremo uno schema composto di vagoni... voglio dire dei circuiti seguenti:

Cambiamento di frequenza della figura 126;

Due stadi amplificatori MF della figura 115 (ma con prese sui primari onde ridurre lo smorzamento);

Rivelatore della figura 119;

Due stadi di BF a resistenza capacità della figura 90;

Uno stadio finale push-pull della figura 101.

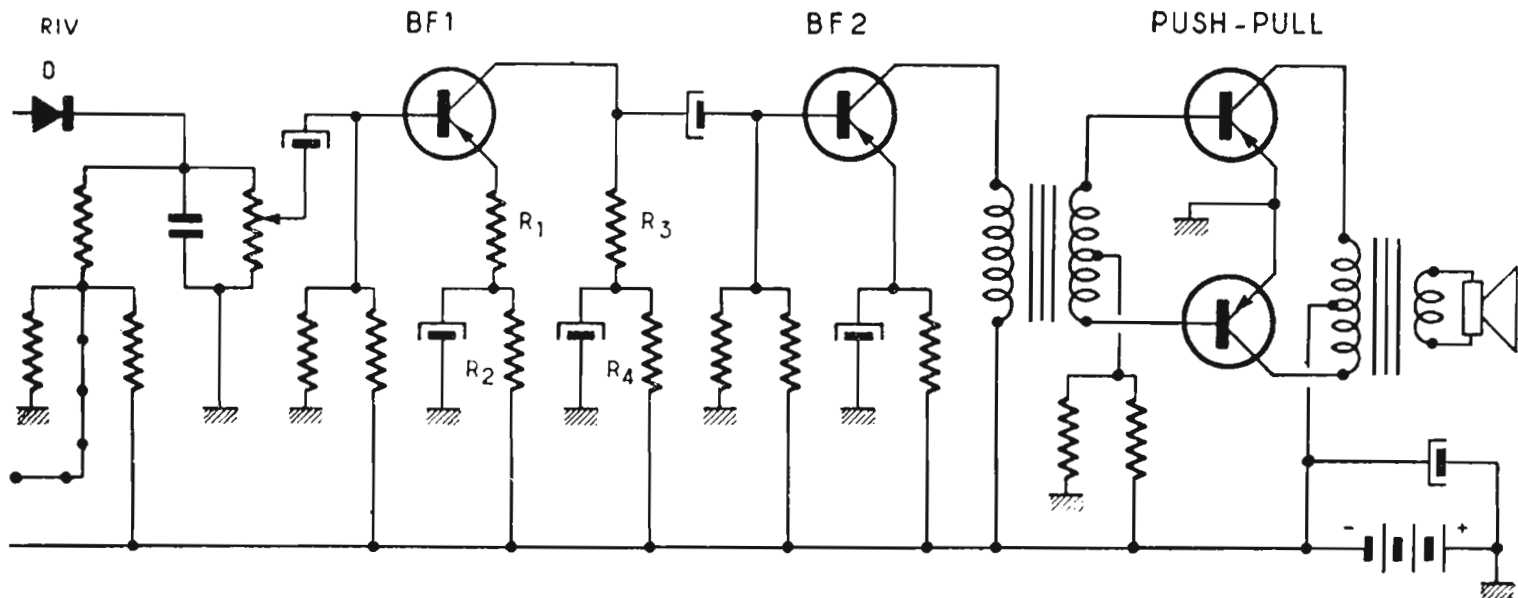
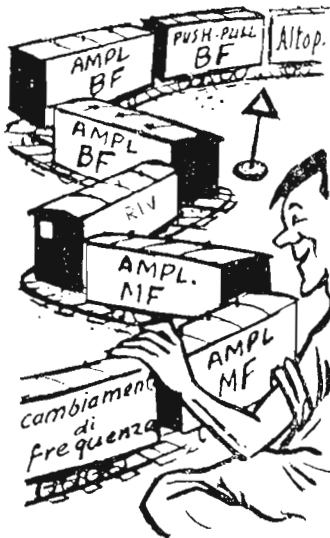
Vi chiedo di esaminare attentamente questo schema che è all'incirca (salvo qualche dettaglio) quello della maggior parte di quei ricevitori tascabili che hanno turbato le vostre ore di vacanza sulla spiaggia. Vi trovate qualcosa di poco chiaro?

L'ANTENNA MINIATURA

Ign. - Effettivamente c'è qualcosa che non mi va: non vedo alcuna antenna.

Cur. - Ed infatti il ricevitore funziona senza antenna. La bobina d'entrata L_1 è avvolta su un bastoncino di ferrite e capta così le onde esattamente come un'antenna a telaio.

Ign. - Ma il diametro di questa bobina non deve essere grande per ottenere un sufficiente potere di captazione?

Cur. - No, perchè la ferrite è una ceramica magnetica ad alta permeabilità. E' come dire che essa aspira, sotto un certo aspetto, tutti i campi magnetici che si trovano nelle sue vicinanze. E così la picco-

I vari valori dei componenti, dipendono dai tipi di transistori utilizzati.

la bobina il cui diametro non eccede i due centimetri può avere lo stesso potere collettore di un grande telaio in aria. Essa ne possiede anche il noto potere direttivo, ciò che obbliga a orientare convenientemente i ricevitori portatili, ed accresce la loro selettività, attenuando anche i parassiti provenienti da altre direzioni. Notate, Ignoto, che in pratica, al posto di un unico avvolgimento L_1, (come pure al posto degli avvolgimenti dell'oscillatore L_2 e L_3) vi si trovano normalmente diversi avvolgimenti, messi in circuito da un commutatore e corrispondenti ciascuno ad una gamma d'onde. Così, se ne hanno due, sui ricevitori che servono alla ricezione delle onde medie e lunghe. Se si devono anche ricevere le onde corte, vi si aggiunge un piccolo avvolgimento collegato però ad una piccola antenna, perchè la ricezione delle onde corte, col telaio a ferrite è difficile. Vi sono per voi altri punti oscuri?

TUTTO E' CHIARO

Ign. - Assolutamente no. Constato che la polarizzazione di tutte le basi è fissata mediante divisori di tensione.

Cur. - Si è anche curato di rendere queste ultime regolabili, impiegando a questo scopo, in ogni coppia di resistenze, una variabile. La scelta corretta del punto di funzionamento è estremamente importante.

Ign. - Suppongo inoltre che, i due transistori di potenza costituenti il push-pull finale, siamo polarizzati in modo da funzionare in classe *B*, ciò che economizzerà il consumo della batteria.

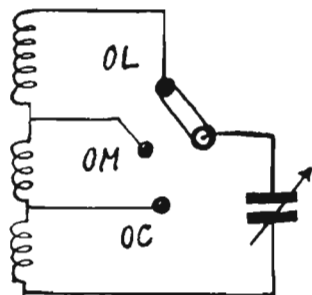
Cur. - Per saggiare le vostre cognizioni, posso chiedervi qual'è il ruolo delle resistenze R_1, R_2, R_3 e R_4?

Ign. - R_1 che non è disaccoppiata, è una resistenza di controreazione serie. Essa riduce il tasso di distorsione. Inoltre la sua azione si aggiunge a quella di R_2, che serve a stabilizzare lo stadio compensando gli effetti del cambiamento di temperatura. In quanto a R_3, è la classica resistenza di carico. Infine R_4, col suo condensatore, serve a disaccoppiare il circuito di collettore, per evitare degli accoppiamenti parassiti.

LUNGA VITA AI TRANSISTORI

Cur. - Bravo Ignoto! Ho la gradita impressione di non aver perso il mio tempo spiegandovi il funzionamento dei transistori, e le loro applicazioni negli amplificatori e radioricevitori.

Ign. - Poichè, ritengo, non si limitano a questi, gli impieghi delle « bestie a tre gambe »?

Cur. - Pensate, mio caro amico, con quale entusiasmo tutti gli elettronici si sono gettati su questi meravigliosi triodi a cristallo, di ingombro e peso infimi, di appetito modicissimo (paragonato a quello delle valvole che necessitano di una corrente d'accensione) e la cui longevità è notevole. Dieci anni dopo la creazione del primo transistore, persone molto serie affermavano già che i triodi a cristallo potevano funzionare per almeno centomila ore. Ma la cosa più curiosa è che i dieci anni in questione non comprendevano che 87.648 ore in

tutto! Tenendo anche conto degli anni bisestili... Sembra pertanto, che l'estrapolazione alla quale si è accennato, più che ardita, si rivela esatta e fors'anche al disotto della realtà.

Ign. - So che le macchine da calcolo, i cosidetti « cervelli elettronici » fanno grande uso di transistori. Alcune ne contengono decine di migliaia.

Cur. - Voi capite quale vantaggio offrono in questo caso il loro piccolo ingombro e l'assenza pratica di ogni sviluppo di calore.

Ign. - Ed il volume ridotto ha permesso anche di realizzare degli apparecchi di protesi auditiva, cioè gli amplificatori per i sordi, che sono contenuti nelle stanghette degli occhiali rendendoli così perfettamente invisibili.

Cur. - Esatto. Voi potete immaginare quanto siano apprezzate le qualità dei transistori negli ordigni spaziali ove ogni grammo, ogni

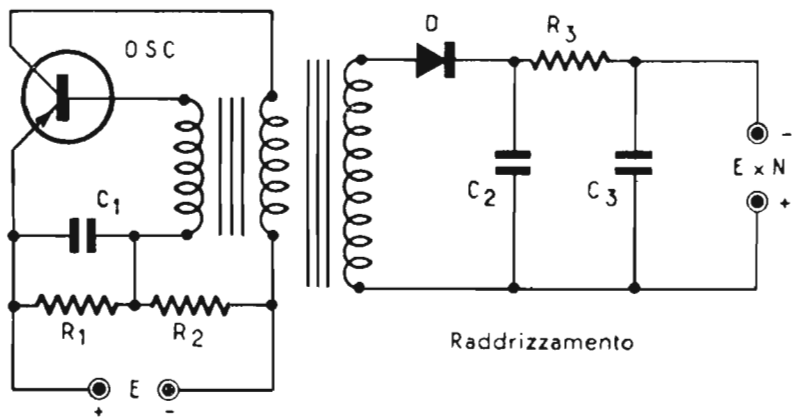
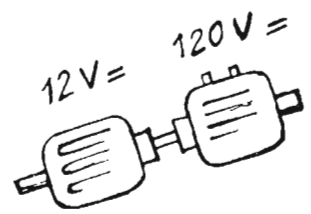



Fig. 129 - Convertitore di corrente continua che permette di elevare N volte la tensione E della sorgente. Il divisore di tensione R_1-R_2 serve a polarizzare convenientemente la base.

centimetro cubo, ogni milliwatt delle sorgenti d'alimentazione, conta enormemente.

Ign. - Insomma, in tutti i campi, il transistore è capace di sostituire vantaggiosamente i tubi elettronici.

Cur. - Non correte troppo! Sino a nuovo ordine, rimangono ancora delle applicazioni ove i tubi sono insostituibili, come per esempio, i trasmettitori di potenza. Per contro, vi sono dei problemi che solo il transistore permette di risolvere. Ciò equivale a dire che tubi a vuoto e semiconduttori possono condurre una coesistenza pacifica, trovando ciascuno il proprio impiego specifico.

Noi avremo, senza dubbio, un'altra occasione di parlare degli impieghi del transistore, come commutatore, come multivibratore, come regolatore, tutti tipi di vagoni che voi non conoscete ancora, e che sono impiegati nella composizione di treni elettronici, coi quali potremo divertirci. In tale attesa, ve ne mostrerò un piccolo esempio: il convertitore di corrente continua che coi transistori è molto più semplice da realizzare che coi tubi.

UN CONVERTITORE SILENZIOSO

Ign. - Che cosa intendete dire con « convertitore di corrente continua »?

Cur. - Un dispositivo che permette di elevare la tensione di una sorgente di corrente. Un tempo, per ottenere ciò, si doveva ricorrere ad un motore a corrente continua che, alimentata, per esempio da una batteria a 12 V, faceva girare una dinamo a corrente continua a, diciamo, 120 V.

Ign. - Quale complicazione e sicuramente quale basso rendimento!

Cur. - Attualmente è possibile mediante un transistore, effettuare l'operazione senza rumore, senza organi in movimento e con un miglior rendimento. A questo fine, si trasforma la corrente continua della sorgente di tensione E, in corrente alternata. Lo si può fare mediante un transistore montato come oscillatore BF bloccato. Vi ricordo che si chiamavano così, gli oscillatori con gli avvolgimenti accoppiati strettamente e che generano oscillazioni che sono ben lontane dall'essere sinoidali, ciò che in certi casi poco importa.

Ign. - Indovino già il seguito. Un terzo avvolgimento posto sullo stesso nucleo, comportante molto più spire, permette di elevare la tensione alternativa. Non rimane allora che reddrizzarla mediante un diodo e livellarla mediante la resistenza R_3, associata ai condensatori C_2 e C_3, per ottenere una tensione continua elevata N volte.

Cur. - Una volta di più, Ignoto, voi date prova di una notevole acutezza d'intuizione, della quale mi felicito.

Credo che voi avete ben assimilato i miei insegnamenti e che ve la caverete discretamente nell'orientarvi nel dedalo degli schemi a transistori.

Avete anche capito che la tecnica dei semiconduttori è ancora in piena evoluzione, che essa sta per conquistare nuovi campi d'applicazione (fra i quali quello della televisione), che i progressi della tecnologia ci riservano, senza dubbio alcuno, molte sorprese.

Vi vorrei anche dare un buon consiglio: non lasciatevi superare da questi progressi. Seguiteli attentamente, leggete gli articoli pubblicati nella stampa tecnica. Abbiate sempre presente nella mente questo pensiero di Bacone: « Colui che non si rinnova si distrugge, perchè la marcia inesorabile del tempo trasforma ogni cosa ».

Non esitate infine, a mettere in pratica le vostre cognizioni; sperimentando voi stesso dei circuiti a transistori.

Vi renderete conto, allora del fatto che...

Ign. - ... il transistore?... ma è semplicissimo.

INDICE